日機連２０高度化－１２

平成２０年度
設備管理技術の新展開に関する調査報告書

平成２１年３月

社団法人　日本機械工業連合会
株式会社　日鉄技術情報センター

この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。
http://ringring-keirin.jp/

序

我が国機械工業における技術開発は、戦後、既存技術の改良改善に注力することから始まり、やがて独自の技術・製品開発へと進化し、近年では、科学分野にも多大な実績をあげるまでになってきております。

しかしながら世界的なメガコンペティションの進展に伴い、中国を始めとするアジア近隣諸国の工業化の進展と技術レベルの向上、さらにはロシア、インドなどＢＲＩＣｓ諸国の追い上げがめざましい中で、我が国機械工業は生産拠点の海外移転による空洞化問題が進み、技術・ものづくり立国を標榜する我が国の産業技術力の弱体化など将来に対する懸念が台頭してきております。

これらの国内外の動向に起因する諸課題に加え、環境問題、少子高齢化社会対策等、今後解決を迫られる課題も山積しており、この課題の解決に向けて、従来にも増してますます技術開発に対する期待は高まっており、機械業界をあげて取り組む必要に迫られております。

これからのグローバルな技術開発競争の中で、我が国が勝ち残ってゆくためにはこの力をさらに発展させて、新しいコンセプトの提唱やブレークスルーにつながる独創的な成果を挙げ、世界をリードする技術大国を目指してゆく必要があります。幸い機械工業の各企業における研究開発、技術開発にかける意気込みにかげりはなく、方向を見極め、ねらいを定めた開発により、今後大きな成果につながるものと確信いたしております。

こうした背景に鑑み、弊会では機械工業に係わる技術開発動向調査等のテーマの一つとして株式会社日鉄技術情報センターに「設備管理技術の新展開に関する調査」を調査委託いたしました。本報告書は、この研究成果であり、関係各位のご参考に寄与すれば幸甚です。

平成２１年３月

社団法人　日本機械工業連合会
会　長　　金　井　　務

はしがき

設備産業の取るべき方策としては経年劣化の進んだ旧設備を廃棄し最新性能の設備を建てる、いわゆるスクラップアンドビルドが理想です。しかし東アジア等における新規大規模設備の稼動、国内需要の伸び悩みもあり、企業は新規プラントを建てる経済的状況にありません。逆に、輸入品との競争の激化から製造コストの一部である修繕費あるいは更新に掛かる費用を切り詰める必要に迫られています。加えてこの産業を支えてきた高い能力を持ち、過去のトラブルから多くの知見を蓄えた経験豊富な設備管理要員（ベテラン）の高齢化が急速に進んでいることや、競争力強化を目的とした組織のスリム化の影響もあって、これらベテランが長年にわたって蓄積してきた設備管理技術の継承が充分行われていないのが現状です。

一方、製造事業所における最近の設備事故も増加しており、平成 10 年に比べて、平成 19 年は約 7 倍となっています。この原因を見ると設備の劣化、腐食等が多いことが特徴であり、設備管理の方法および設備管理技術の重要性が伺われます。今日の社会では、事業の形態や規模にかかわらず、その事業活動や生産物が人々の生命･身体、健康、財産および環境を脅かすものでないことが深刻に求められています。国の安全指針や基準を守っていても事業者の安全責任が問われ、最新の科学技術知見に照らした安全性が求められるようになってきました。

今後の設備産業においては、設備アセットマネジメントの重要性が高まるとともに設備管理技術の進展が必要となっています。わが国の設備管理技術レベルは世界の中で優位にあり、今後の新たな設備管理技術の展開は、設備設計を含めた設備技術のパラダイムシフトをもたらすなど世界をリードしていく可能性があります。

このような背景から、本調査は、設備管理技術の内外の動向を調査し、今後の設備管理技術の方向を明らかにすることを目的としたものです。本調査結果が今後の設備管理技術の発展にとって関係各位の参考になれば幸いです。

平成２１年３月

株式会社　日鉄技術情報センター
社　長　　阿　部　一　正

目　　次

概要
1.本調査研究の目的と実施内容
2.調査研究結果の要約

本文
第1章　設備管理技術の変遷 ---- 1
1.1　事後保全から予防保全 ---- 1
1.2　信頼性中心保全(RCM) ---- 3
1.2.1　RCMの歴史 ---- 3
1.2.2　RCM実施の基本手順 ---- 3
1.3　危険度評価法の試み ---- 6
1.3.1　FTA(Fault Tree Analysis) ---- 6
1.3.2　ETA(Event Tree Analysis) ---- 7
1.3.3　HAZOP(Hazard and Operability Study) ---- 9
1.3.4　FMEA(Failure Mode and Effects Analysis) ---- 10
1.3.5　GO-FLOW ---- 11
1.4　リスクベース保全 ---- 13
1.4.1　RBM, RB ---- 13
1.4.2　わが国の動向 ---- 17
1.4.3　わが国における事例報告 ---- 19
1.5　故障物理に基づく設備管理技術 ---- 22
1.5.1　LEAFの概念 ---- 22
1.5.2　LEAFの方法 ---- 23
1.5.3　設備管理技術開発センター(LRDC)の取り組み ---- 28
1.6　まとめ ---- 32
参考文献（第1章） ---- 34
第2章　最近の設備事故 ---- 37
2.1　最近の設備事故の概要 ---- 37
2.2　設備事故の特徴と原因 ---- 39
2.3　設備保全費用と設備保全技術者の変化 ---- 43
2.4　まとめ ---- 46
参考文献（第2章） ---- 47
第3章　設備管理技術を取り巻く動向 ---- 49
3.1　設備安全に関する政策・基準の動向 ---- 49
3.1.1　欧米の法規格 ---- 49
3.1.2　わが国における圧力設備の維持規格の動向 ---- 52
3.1.3　自主保全の動き ---- 55
3.2　経営戦略的な設備管理 ---- 57
3.2.1　現状と狙い ---- 57
3.2.2　基本的なシステム構成 ---- 57
3.2.3　サブシステムと基本手法の例 ---- 61

3.3　まとめ 67
参考文献（第3章） 67
第4章　設備診断技術の動向と設備管理技術 69
4.1　予防保全の課題 69
4.1.1　予防保全と最適保全周期 69
4.1.2　予防保全の課題 71
4.2　保全方式の進展 74
4.2.1　予知保全CBMと信頼性保全RCM 74
4.2.2　プロアクテイブ保全 75
4.3　設備監視診断の進展 79
4.3.1　新たな設備診断技術の例 79
4.3.2　最近の設備監視診断アルゴリズムの紹介 80
4.4　まとめ 85
参考文献（第4章） 85
第5章　今後の設備管理技術と新しい設備産業の展開 87
5.1　設備管理技術の要件と要素技術 87
5.2　各設備管理技術の特徴 89
5.3　今後の設備管理技術の課題と方向 93
5.4　まとめ 97
参考文献（第5章） 97
第6章　決言 99

概　要

1. 本調査研究の目的と実施内容

(1)本調査研究の目的

設備管理技術は、確率論やリスク論などの様々な考え方が提案され、設備保全マネジメントに利用されてきた。しかし、最近では経験的な情報による設備管理技術では予測し得ない事故が発生しているケースが多くなってきている。また、IT の発展によって、モデルの精度やデータの取扱量を格段に増加させることが可能となり、決定論的な設備管理技術手法を実用化できる可能性が高くなっている。設備事故発生の原因分析や予測管理には多くの条件因子を取り込んでおく必要があり、一対一の対応からより高次の効果を対象とした複雑系の分析の必要性も提案されている。

一方、不断の技術革新や国際化への対応の必要性から、安全に関して機能性規定化が議論されており、自分たちの持っている技術基準で法律が要求する機能を満足させる、即ち、法律で守っていれば許される順法主義から自主保安責任に切りかえる必要がでてきた。このように、設備に対して設計とともに劣化予測などの設備管理技術の一体化が必要となっている。

本調査は、設備管理技術の内外の動向を調査し、今後の設備管理技術の方向、新しい設備技術産業の展開の可能性について明らかにすることを目的とする。

(2) 事業の内容

①設備管理技術の変遷の調査

キーワード検索により抽出する最近 10 年間に発表された文献、学会における発表および調査報告書に基づいて設備管理技術の変遷を概観する。その中からリスクベース設備管理技術および故障物理に基づいた設備管理技術などの代表的な設備管理技術を抽出し、さらに有識者や関連する団体などのヒアリングによって、その現状を明らかにする。

②最近の設備事故の分析

公表されている設備事故データや事故解析データなどをベースとして事故事例調査・分析を行う。

③設備管理技術を取り巻く動向の調査

文献および官公庁や関連団体が発表している維持基準・制度、調査データなどから、設備産業の設備保安状況、民間の自主基準や自主保安などの動向について明らかにする。

④今後の設備管理技術と新しい設備産業の展開

上記の結果から、設備管理技術に求められるもの、今後の設備管理技術の要件などから今後の設備管理技術の方向についてとりまとめる。

2. 調査研究結果の要約

(1) 設備管理技術の変遷

従来は、設備は故障したら修理すると言う考え方が一般的であったが、設備が大型化し、生産システムが複雑になるにつれて、設備の故障によって生産が停止、または操業度が下がることが大きな損失につながるようになった。そこで、故障による稼働率の低下を回避するために予防保全(Preventive Maintenance)が提案された。1960 年代に、アメリカでは航空機の安全を確保するために新しい保全技術である信頼性中心保全方式 RCM(Reliability Centered Maintenance)、が開発され、航空機分野のみでなく、発電所、建築システムなど様々な分野で活用されている。設備の安全を確保し、事故･故障を未然に防ぐためには、設備にどういう危険が含まれているか、内在する危険を知ることが重要である。内在する危険、及びその程度を前もって知るために、いくつかの危険度評価手法が開発され、使用されてきた。

アメリカ石油協会(API)が 1996 年に石油産業設備を対象とした最初のリスク基準メンテナンス検査計画方法(RBI)を提案し、それ以降の欧州でも規格化の動きがあり、リスク基準メンテナンス（RBM）活動が盛んになっている。RBM では、リスクを破損の起こりやすさと被害の大きさの積と定義し、故障、事故などをリスクという量的な概念で捕らえ、安全と危険の大きさを連続した量として扱い、リスクの大きさによって危険度を評価するものである。RBI を適用することによって、保全回数、保全コストが大幅に削減された例などが紹介されている。

日本では、故障メカニズムに基づく寿命予測手法である LEAF(Life Estimation Analysis based on Failure mechanisms)が提案され実用化が進められている。これは、部品・部位を起点に機能を明確にして機能に対するストレスを考え、各々の部品・部位のストレス毎に故障を考えた上で寿命予測の精度を上げていくシステムであることが特徴である。ここでは設備を機能展開し、各構成要素に対して特定の劣化がどのようなメカニズムで進展するかを故障物理によって想定し、保全カレンダーに反映する仕組みで設備管理を行うものである。

(2) 最近の設備事故

近年増加している設備事故の主要な原因は経年劣化である。背景には高経年設備の増加、団塊ベテラン層の減少、中堅・若手への技能伝承の遅れ、保全費用の圧縮など複合的な要因が挙げられている。

(3) 設備管理技術を取り巻く動向

米国ではわが国に比べて早くから設備の維持管理基準の検討がされ、米国機械学会(ASME)、石油学会(API)などを中心に維持規格の体系が整備されてきた。

規制緩和の動きと共に、設備の自主保安の動きが加速されており、形式的や建前論に片寄りがちな安全規制から実効性を重視した安全規制への転換が促進されている。このため

には、科学的合理性を追求・活用することや、民間規格策定に一層努めることが必要である。

経営戦略的なシステムとして、ROA の視点を取り入れてステイクホルダーの利益を最大化するための設備保全が求められている。CMMS/EAM 等の保全業務の PDCA サイクルを実行するためのシステムや仕組みが存在することを前提として、それらのシステムから保全データを取り込んで評価し、戦略化するというより大きな PDCA を行うことによって新たな戦略システムとすることが進められている。

(4) 設備診断技術の動向と設備管理技術

設備診断技術は設備管理技術の重要な部分を構成している。予防保全の経年劣化による故障への対策のみに有効であるとの理論的欠陥を克服するために予知保全 CBM(Condition Based Maintenance)、および信頼性保全 RCM(Reliability Centered Maintenance)が誕生し、さらに、日本でいう改良保全の欧米版と思われる劣化原因除去型保全であるプロアクテイブ保全 PRM(Proactive Maintenance)が設備保全戦略として提案された。プロアクテイブ保全 PRM は現在欧米で盛んに議論されている方式であるが、設備診断技術の原因系への適用成果と共通している。これらの関連技術を包含したシステムとしてプラント資産管理システム PAM がある。設備診断は過去の様々な手法が開発され、実用化されてきたが、各種の設備診断技術の総合化・システム化が進められており、精度の向上や設備診断データによる寿命予測などの新たな展開が検討されている。

(5) 今後の設備管理技術と新しい設備産業の展開

最近の設備管理技術の主要な要素技術には、RCM、RBI/RBM、LEAF、CBM などがある。LEAF は網羅性の確保、原因に遡った故障メカニズム、寿命予測に特徴があり、RCM、RBI/RBM は故障影響の把握や保全方式の選択などの経営管理上の利用に特徴がある。

設備管理の目的は、ステイクホルダーの利益の最大化であるが、このためには、アセットマネジメントの考え方、即ち、ROA の最大化を目指すことが求められている。設備産業界では、ライフサイクルコストを下げるため高経年設備管理が重要な課題である。今後は、従来の方式で対処しても故障を十分に防ぐことは難しく、特に、潜在的な劣化現象を把握して対応することが必要であり、劣化管理の網羅性が重要な視点である。さらに、劣化程度を適切に見極め評価するための、検査、診断、寿命予測、およびデータ管理等の技術が重要である。

第 1 章　設備管理技術の変遷

1．1 事後保全から予防保全[1)]

設備は使用するに従って劣化し、やがて壊れる。古くから道路、建物など壊れたら部分的に修理しながら使用されてきた。現在家庭で使用されている電化製品なども基本的には壊れたら修理するという方法で使用されている。生産設備においても、初期には壊れたら補修するという考えかたが行われてきた。この考え方を事後保全(Corrective Maintenance または Breakdown Maintenance)と言う。生産設備の保全に関しては、壊れるという状態をどのように発見するかが問題となる。設備全体が止まってしまうような故障は何もしなくても結果として判る。しかし、設備全体が機能障害を起こす前の部分で局部的な障害を発見し、補修することによって設備の操業を継続させるようなことも、事後保全の範疇に入る。

設備が大型化し、生産システムが複雑になるにつれて、設備の故障によって生産が停止、または操業度が低下することが大きな損失につながるようになった。そこで、故障による稼働率の低下を回避するために提案されたのが予防保全(Preventive Maintenance)である。予防保全と言う用語は、その後に提案された他の方法－予知保全など－と区別して独立の技術として扱う考え方もある[2)]。また、当初提案された予防保全の具体的な方法論は、信頼性が低下した部品、すなわち故障率が大きくなった部品は故障率の小さい新品の部品に更新することによって故障の危険性を軽減すると言う確率論的考え方に基づいた保全方式として定義されたが、やがて故障に至る前に保全を行うと言う広い意味に拡大されている[1)]と言う解説もある。

予防保全は、設備が故障することによる操業度低下などの損失が、故障の原因となる部品の交換などの費用よりはるかに大きい場合、部品の余寿命が残っていても交換した方が得策である。しかし、問題はその交換時期であり、余寿命がかなり残っているのに交換するのは経済的ではない。交換時期を適切に決めることが非常に重要であるが、また難しいことである。JIS 信頼性用語の保全の項目には保全の方式が図 1.1.1 のように記されている。

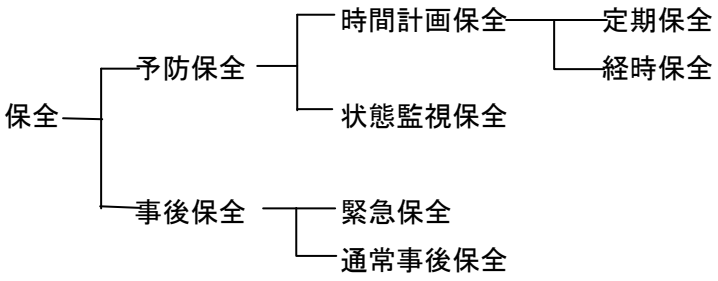

図 1.1.1 JIS による保全方式の分類

交換時期の決定あるいは保全周期をどのように決定するかについて、様々な方法が提案され、実際に試みられている。予防保全の考え方が出てきて以来、どのようにして保全を行い、交換時期を決めるかが最大の問題になり、様々な試みがなされてきた。大きな流れは、以下のようなものである。

年代	略記	英文	日本語	提唱者
		Corrective Maintenance or Breakdown Maintenance	事後保全	
	PM	Preventive Maintenance	予防保全	General Motors
1950 年代	PdM	Predictive Maintenance	予知保全	
1965	RCM	Reliability Centered Maintenance	信頼性中心保全	アメリカ航空局ユナイテッド航空　ボーイング
1980	RBI	Risk Based Inspection	リスクベースインスペクション	API
1980	RBM	Risk Based Maintenance	リスクベースメンテナンス	API
1970 年代	FTA	Falt Tree Analysis	フォールトツリー解析	
	ETA	Event Tree Analysis	イベントツリー解析	
1974	HAZOP	Hazardous and Operability Study	ハザード・運転解析	ICI
1990 年代	GO-FLOW			船舶技術研究所松岡猛
2003	LEAF	Life－span Estimation Analysis based on Failure Mechanisms		大島榮次

1．2 信頼性中心保全(RCM)

1.2.1 RCM の歴史

1960 年代に、アメリカでは航空機の大型化と整備量の増大によって、どのようにして航空機の安全を確保するかが大きな問題になった。航空機事故が必ずしも設計の問題ではなく、保守方法の不適切によるものが少なくないことから、新しい保全技術の体系を確立する必要があった。そこで 1965 年、アメリカ航空連邦局、ユナイテッド航空、ボーイング社の 3 者で新しい保全の体系が検討された [3]。

1961 年に「EAA/業界信頼性プログラム」が発表された。その後、1965 年にユナイテッド航空株式会社が MSG-1(Maintenance Steering Group-1)「ハンドブック:保全性評価及びプログラムの開発」を纏めた。RCM として、製品の性能故障を防止する保全計画の意思決定ロジックツリー方式を発表し、これをボーイング 747 の保全計画に活用した。

1970 年に MSG-2「航空会社/メーカー保全性プログラム計画文書」が発表された。意思決定ロジックツリーが改善された。これがロッキード 1011 とダグラス DC-10 の時間計画保全に活用された。

さらに 1980 年に MSG-3「重要構造物に対する保全性プログラム」が発表された。
これらの手法を活用して、RCM(Reliability Centered Maintenance)、信頼性中心保全方式が航空機分野のみでなく、発電所、建築システムなど様々な分野で活用されている [4]。

1.2.2 RCM 実施の基本手順 [4]

RCM は、信頼性、保安性管理に対する基本的な考え方を示しており、特に RCM 自身が特定の方法論を定義しているものではない。従って、航空機以外にその考え方を応用しようとする場合、RCM が提唱する論理的判断基準を基に保全方式を選択する必要がある。以下の手順に従って実施する。

①稼働率や経済性などの改善を目的に解析対象システムを決定する。

②システム機能解析とブロック化を行う。故障モード・影響解析(FMEA)のためにシステムの信頼性ブロック図を作成する。

③故障モードを抽出する。システム、機器ごとの故障モードの抽出は、故障データの活用やエネルギーフローのような抽出法があるが、ブレーンストーミング法が一層効果がある。

④影響解析：重要機器を摘出する。

まず FMEA 解析として、機器の故障モードごとに上位システムへの影響を評価し、影響が大きい重要機器を摘出する。次に RCM 決定ロジックツリーによって、各重要機器の故障時の影響について解析する。

⑤保全作業方式を選択する。重要機器ごとに、保全作業方式を RCM 決定ロジックツリーにより決定する。

⑥生涯保全性プログラム

機器ごとの保全作業の方式と、周期を検討して決定する。
保全作業の周期は、事故時の影響、経験データ、取扱説明書、法規などを基に決定される。
機器、部位ごとに余寿命予測した残存年月を推定する。
⑦最新保全性プログラム

設計改善及び運用開始後の運転経験などをもとに、保全作業方式と保全作業の周期、余寿命予測した残存年月を定期的に見直しする。

RCM 手法の特徴は、RCM 決定ロジックツリーによって、保全作業の方式を検討し、決定することである。RCM 決定ロジックツリーは、次の 2 段階で解析を進める。

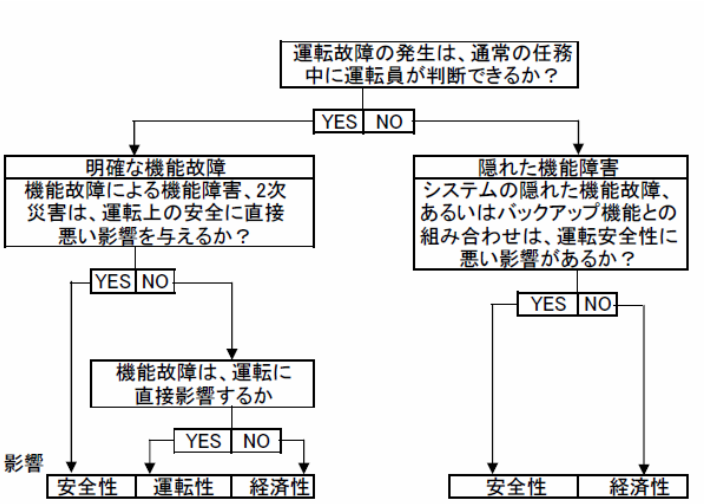

図 1.2.1 RCM 決定ロジックツリー　機能故障による影響評価[4)]

①機能障害による影響評価

機器の機能故障による影響を安全性、運転性、経済性について評価する。機能故障による影響評価を行う RCM 決定ロジックツリーの例は、図 1.2.1 のようである。

②保全作業方式の選択

機能故障による安全性、運転性、経済性への影響を考慮して、機器の故障発生を防止するための保全作業方式を決定する。保全作業決定のロジックツリーの例は図 1.2.2 のようである。図 1.2.1 で評価された影響を基に、安全性への影響がある場合には定期保全、モニタリング保全、オンコンディション保全、修復保全の順に検討し、いずれか有効な保全作業を行う。

RCM 解析結果、機器の信頼性などが維持できていない場合には、デザインレビューや寿命によるシステム、機器の交換を提案するなどの対策をとる。

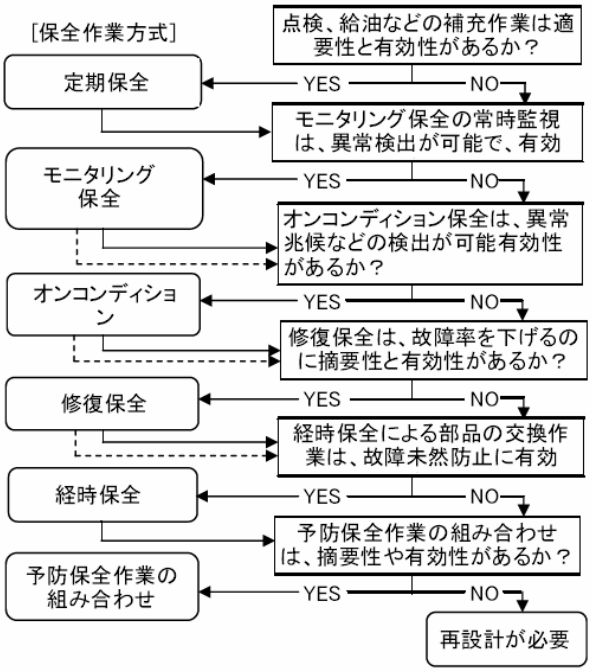

図 1.2.2 RCM 決定ロジックツリー
保全作業方式の選択[4)]

RCM の効果としては、以下のようなものが期待されている[3)]。

①保全のトレーサビリティー

長期的観点から、保全にかかわる意思決定や情報が正確に記述される点が最大のメリットである。

②コスト削減

時間基準予防保全(TBM)によるオーバーメンテの削減、予知保全(PDM)導入による保全作業量の削減、予備品在庫量の削減などに効果が大きい。

③保全作業の合理化

不必要な保全作業、未完成又は管理なし保全作業の削減。

④プラント改良

設備の故障原因や保全性不良原因の解明による設備改良。

⑤教育効果

全社員の技能とモラルの向上に効果がある。

1．3 危険度評価法の試み

1.3.1 FTA(Fault Tree Analysis)[5)]

1960 年代から開発されてきた信頼性解析の方法のひとつが FTA（フォールトツリー解析）である。頂上事象と呼ばれるシステムの特定の故障、事故などの結果に対して、基本事象と呼ばれる統計的に独立と考えられる故障原因などの要素との関連を、主に論理的 AND と論理的 OR で表されるブール論理によって図的に表現したものを FT(Fault Tree)と呼ぶ。

FTA は、1961 年にアメリカのベル電話研究所においてミサイル打ち上げ制御システムの安全性解析に用いられたのを初めとして、主にシステム安全工学技術者によって開発されてきた。その後、航空機、各種交通システム、原子力発電プラント、化学プロセスシステムなど、大規模システムの安全性、信頼性解析の方法として大きな成果を上げるようになった。

FT は、図 1.3.1 に示すように、頂上事象と呼ばれる特定の故障あるいは事故から始めて、その原因を、順により下位の事象に展開して、基本事象と呼ばれる基本原因まで下って示したものである。FT はその名が示すように、システム全体の故障がどのような基本故障原因の組み合わせになっているかを演繹的に表示するものである。

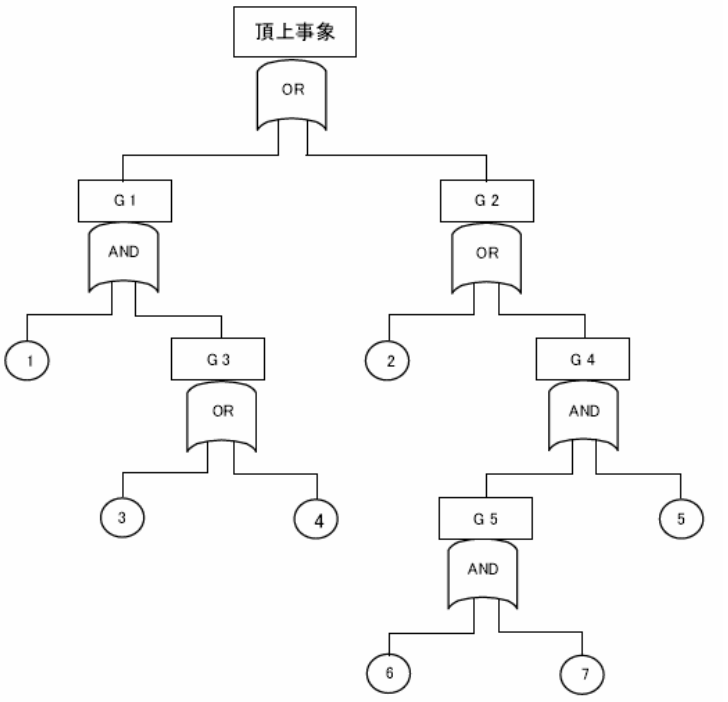

図 1.3.1 フォールトツリー

FTA を行う手順としては、先ずシステムの理解と頂上事象の決定が必要である。

故障、或いは事故が起きた後に、原因究明に FTA の手法を用いる場合は、頂上事象は明確である。大規模なシステムの安全性解析を行うに際しては、システムとして致命的な事故、故障など、起こしてはならないレベルの事象が何であるかを先ず把握して、異常事象を明確にしなければならない。また、このシステム全体の構成要素、各要素の機能の関連や、各要素の正常な動作、異常動作、故障などの情報を理解しておくことが重要である。

FT の作成に当たっては、頂上事象に対して、それを発生する為に必要な事象を明確にして、下位に記述する。その下位事象を発生する為に必要な事象を更に下位に記述しながら、

最後の基本事象にいたるまで、ツリーを作成していく。頂上事象から始めて、上位の事象に対して、下位の事象を AND または OR の論理回路で結んでいく。ひとつの事象を引き起こすのは、単一の要素なのか、それとも下位の複数原因の結果かなど、必要充分条件を吟味しながら進めていく。この作業がもっとも困難な作業であり、多くのベテランの人手が必要なところである。

以上のように、FT の作成は最も重要で時間がかかり、またシステムを熟知しているベテランが必要なところである。しかし、解析者の知識・経験や思考に依存するところが多いので、同じ頂上事象に対して、いつも同じ FT が作成されるとは限らない。そこで、より客観的なシステム構成要素に関する設計知識などを用いて作成する方法がいくつか提案されている。

1.3.2 ETA(Event Tree Analysis)[5)]

ETA (イベントツリー解析)は帰納的な論理図である。ある初期事象から出発して、色々なシーケンスをとることにより、どのような状態になるかを明らかにするものである。ETA を実施することにより、以下の目的を達成することができる。

①初期事象から故障或いは事故に至るまでのシナリオを明らかにする。

②種々の故障、事故に対して、安全性を確保するシステムが成功するか、失敗するかの関係を図示することができる。

③フォールトツリーの頂上事象を定義する手段を与える。

図 1.3.2 は、原子力発電所の一次配管系配管破断を初期現象として展開した ET である。原子力発電所には、安全確保のために種々の施設が備えられている。最初の分岐点で電源の状態を考える。ET では、ある操作が成功すれば分岐点の上方に進み、操作が失敗すれば分岐店の下のほうに進むものとする。この図は、要素の数が増えてくると膨大なものになるが、論理的ではないシーケンス、無意味なシーケンスが含まれていることがあるので、これらを取り除き、更に各機能の関連を考慮に入れて整理すると、実際的で簡素な図になることがある。例えば、この図で、電源がない場合には、それ以降の分岐点が必要ないので、ステップ数が減った簡素なものになる。

各分岐点の失敗の確率を Pi, 成功の確率を(1-Pi)とする。全ての事象が統計的に独立であれば、シーケンスの最終確率は個々の事象の確率の積になる。Pi が充分に小さければ、(1-Pi)は 1 で近似できる。

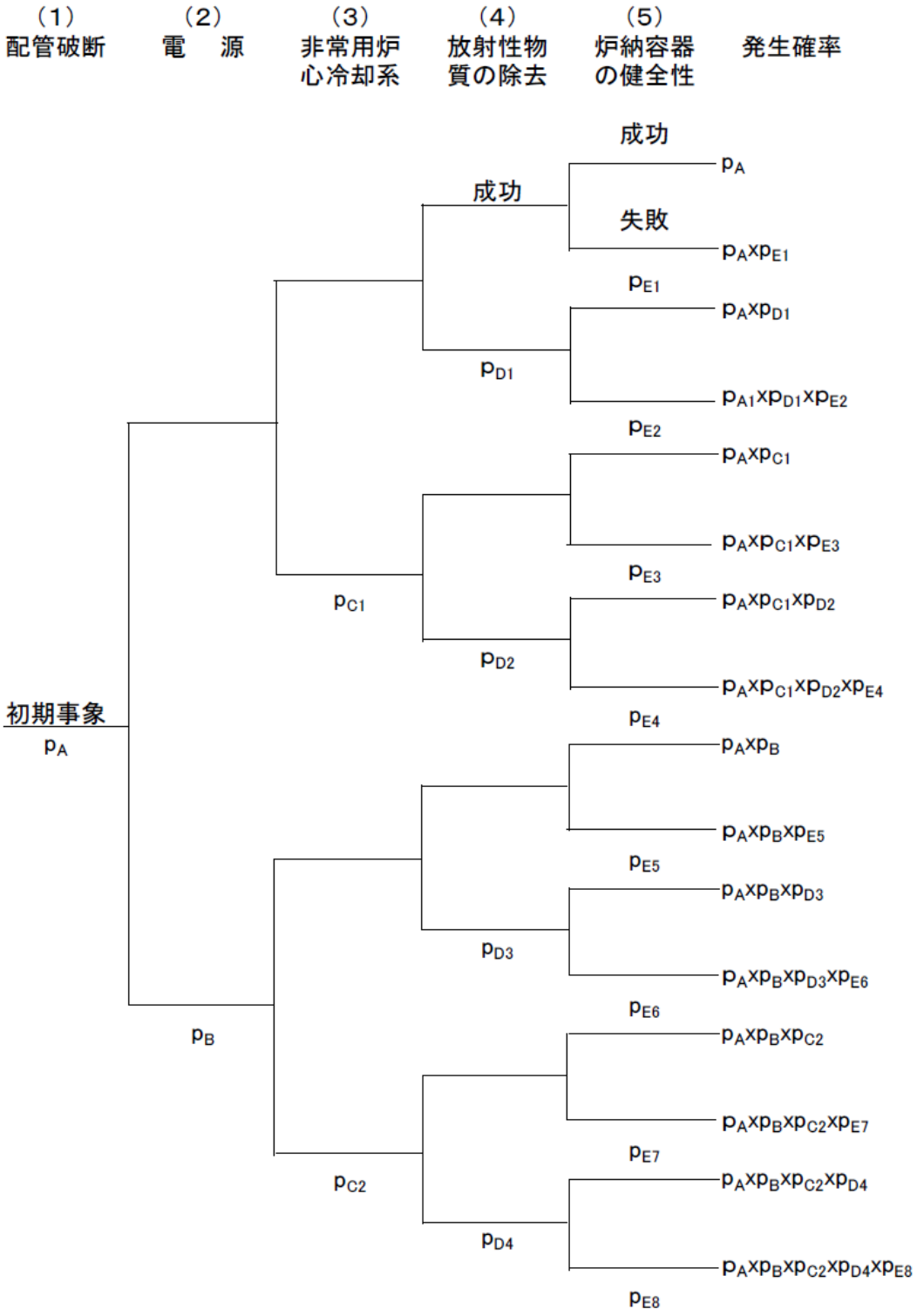

図 1.3.2 原子炉冷却材喪失事故に対するイベントツリーの例

1.3.3 HAZOP(Hazard and Operability Study)

HAZOP は、1974 年にイギリスの ICI 社が自社の化学プラントの安全性評価を目的に開発した手法で、その後 BP Chemical Ltd. や Shell Chemicals(UK)Ltd. など数社によって手法の汎用化が図られ、1977 年に実施マニュアルが刊行された。この手法は、プロセスプラントの計画段階、設計段階、建設段階、供用開始後の運転段階などいずれの段階でも実施可能な手法であり、安全性及び運転操作性の観点から設計内容を確認する手段として使用されている。プロセスシステムの設計又は運転に際して、必ず基準となる条件が設定されている。この手法の解析原理は基準からのずれ(Deviation)に注目して、このずれの発生する原因とその影響を調査して、その対策を検討することである。

実施方法は、グループ討議で解析を進める解析評価技法であり、プロセスの正常状態からのずれを設定することにより、プラントに存在する危険性の洗い出しと操作性の両面から設計内容を系統的かつ網羅的に検討する。

基本手順は以下の通りである。

①解析対象範囲の設定

②P&ID(Piping and Instrumentation Diagram)をスタディ・ノードに分割

③スタディ・ノードとのずれの想定

④ずれの原因の洗い出し

⑤システムへの影響検討

⑥現状の対策評価と追加対策検討

⑦解析結果の記録

これらが、プロセス各部にわたって行われる。

対策としては、設計と運転とに分類する必要があることに注意すべきである。ずれを組織的に検討し、落ちを防ぐ為には、以下のガイドワードに対し、流れ、温度、圧力、液レベル、反応、成分、その他各パラメータとの組み合わせから原因を探る検討を進めていく。

＜ガイドワード＞

NONE：正常な流れがない、または逆流がある。

MORE OF：正常時よりも流れ、温度、圧力、粘度などの物理特性が増加する。

LESS OF：正常時よりも流れ、温度、圧力、粘度などの物理特性が減少する。

PART OF：正常時と比較して、システムの成分が異なる。

MORE THAN：正常時よりも、相の数、不純物などシステムに存在する成分の数が増加する。

OTHER：その他通常と異なっておきること全て。起動、停止、高負荷運転、低負荷運転、運転方法の変更、ユーティリティの供給停止など。

HAZOP は、設計、運転段階のプラントの異常発生原因とその結果について、逐一検討を行い、系統的・網羅的に検討する。解析には長時間を必要とするが、プロセス設計、計装、安全、運転などの各分野の経験豊富なベテランの技術者など、経験豊富な専門家がグルー

プ討議を行うので、異なった視点からの検討が行え、潜在危険の見落としがなく、有効な解析手法と言われている。

1.3.4 FMEA（Failure Mode and Effects Analysis）

1960 年代中期に航空産業において公式適用された FMEA(故障モード影響解析)は、信頼性予測技術の一つである。

FMEA は、もしある事象が発生したらどうなるか、と言う答えを与えることができる帰納的解析手法の一つである。この目的を達成する為に、システムの各要素の故障モードを残らず列挙し、その故障モードが発生した場合に、システムや機器にどのような影響を与えるかを解析する。そしてその故障が発生する原因、故障がシステム機器や運用する人間に及ぼす危険や故障検知方法などを検討し、信頼性を損なう可能性の大きい故障モードを未然に除去する方法である。

FMEA 解析は、システムをいくつかのサブシステムに分け、そのサブシステムにある故障モードが生起した場合、上位のシステムにどのような影響が現れるか、考えられる全ての初期事象を列挙し、その単一故障を想定して系統的に評価するものである。品質管理上の改善や信頼性、保全性、安全性などへの影響を解析することによって、重大な故障となる部品や機器を摘出することができる為、製品設計、製造工程設計の段階でよく使われる。

FMEA 解析では、表形式のワークシートを作成し、系統的に影響の評価を行っていく。ワークシートの項目としては、各機器、サブシステムに対応して、機能、故障モード、故障メカニズム、系統・システムへの影響、故障検出方法などが考えられるが、項目の増減は自由であるため、適用される分野においてそれぞれの分野・対象に最も適した項目を選んでワークシートが作成される。影響を評価するにあたり、影響度、発生頻度、検知度を選定し、これらの項目に対して例えば、1～10 の範囲の数値を評価値として与え、それらの積を重要度の大きさで判断する場合もある [7]。

FMEA は、部品の故障から出発してシステムへの影響を調べると言う単方向型の解析である。この点が HAZOP と異なる。FMEA が、FTA の頂上事象の決定に使用されることもある。また、その名の通り、システムを構成する要素或いはサブシステムの故障モードがシステムの故障、機能障害、操作上の障害などに及ぼす影響を定性的に解析し、明らかにする手法である。従来、信頼性解析の分野で活用されてきたものであるが、現在ではヒューマンエラーのシステムに及ぼす影響、或いはソフトウェアのエラーがシステムに与える影響に対しても利用される。

品質保証の活動の一環として、FMEA は多くの開発部門や工場において見られるようになった。FMEA は信頼性を保証すると言う単独の活動のほかに、品質機能展開に連動して用いられたり、工程の FMEA や生産技術の FMEA として、更に新技術課題を QA 表に展開する手段としても用いられるなどの応用例もある。

FMEA は、システムや機器の弱点を把握することができるから、設計変更、運用上の制

限などの対策を立てることができる。基本設計段階に FMEA を実施すると、任務達成に大きな妨げとなる故障モード、人命の損失、機器の大きな故障・破損、他の広い範囲へ被害を及ぼす故障モードなどを摘出して設計変更を行うなどの抜本的な対策をとることができる。類似の製品の故障情報などを活用すると効果が大きい[8]。

1.3.5 GO−FLOW[5、9)]

従来、システム信頼解析法としてフォールトツリー解析が主として用いられてきたが、近年動的な解析のための手法が必要とされ始めた。システム信頼性解析手法の一つである GO-FLOW 手法では、時間依存性の解析、複雑な動作モードを持つシステムの解析、動的システムの解析など、フォールトツリーにない優れた機能を持っている。

GO-FLOW は、船舶技術研究所で開発された種々の優れた機能を持つ成功確率を追うシステム信頼性解析手法である[9]。まず、解析対象を構成する機器の故障、動作を、標準オペレータを用いてモデル化する。それらの機器間の結合関係は信号線を用いて表現する。その際、AND、OR、NOT 等の論理的結合を表現するオペレータも用意されている

解析対照のモデル化の結果、GO-FLOW チャートと呼ばれる信号線とオペレータから構成される図が作成される。オペレータの動作、故障に対して動作・故障確率をデータとして与え、オペレータの定義に基づき信号を処理していくことにより、最終的にシステムの動作/不動作確率を求めることができる。

オペレータは、基本的に主入力信号 S、副入力信号 P、出力信号 R の３種類の入出力信号を持っている。信号発生を表すオペレータ(タイプ 25)は出力信号のみ、OR、 AND 等の論理ゲートは入力信号と出力信号のみを持っているように、必ずしも全てのオペレータが３種類の信号を持っているわけではない。現在までに、図 1.3.3 に示す 14 種類の標準オペレータが定義されている。

これらオペレータを信号線で繋いでいって GO-FLOW チャートを作っていくわけであるが、各信号は配管中の流れ、電流、情報、指令、時間経過量などを意味している。信号が物理的な流れを表している場合は、「信号の存在」とは「物理的な流れの存在」を意味する。「物理的な流れの存在」とは、ある流体の流れを考えるとき、その下流にある流路の抵抗がなくなったときにその場合において流れが存在すると言うことを意味する。同様に電流の存在は、単に電流が流れている場合だけでなく、下流の抵抗がなくなったときに電流が流れることも意味する。つまり信号の存在とは、実際に流体や電流が流れていることのみでなく、流れる可能性を持っていることも意味する。従って、各オペレータの上流に信号があり、下流に信号がないという状態は、このオペレータでバルブが閉じていると同様のことを意味する。

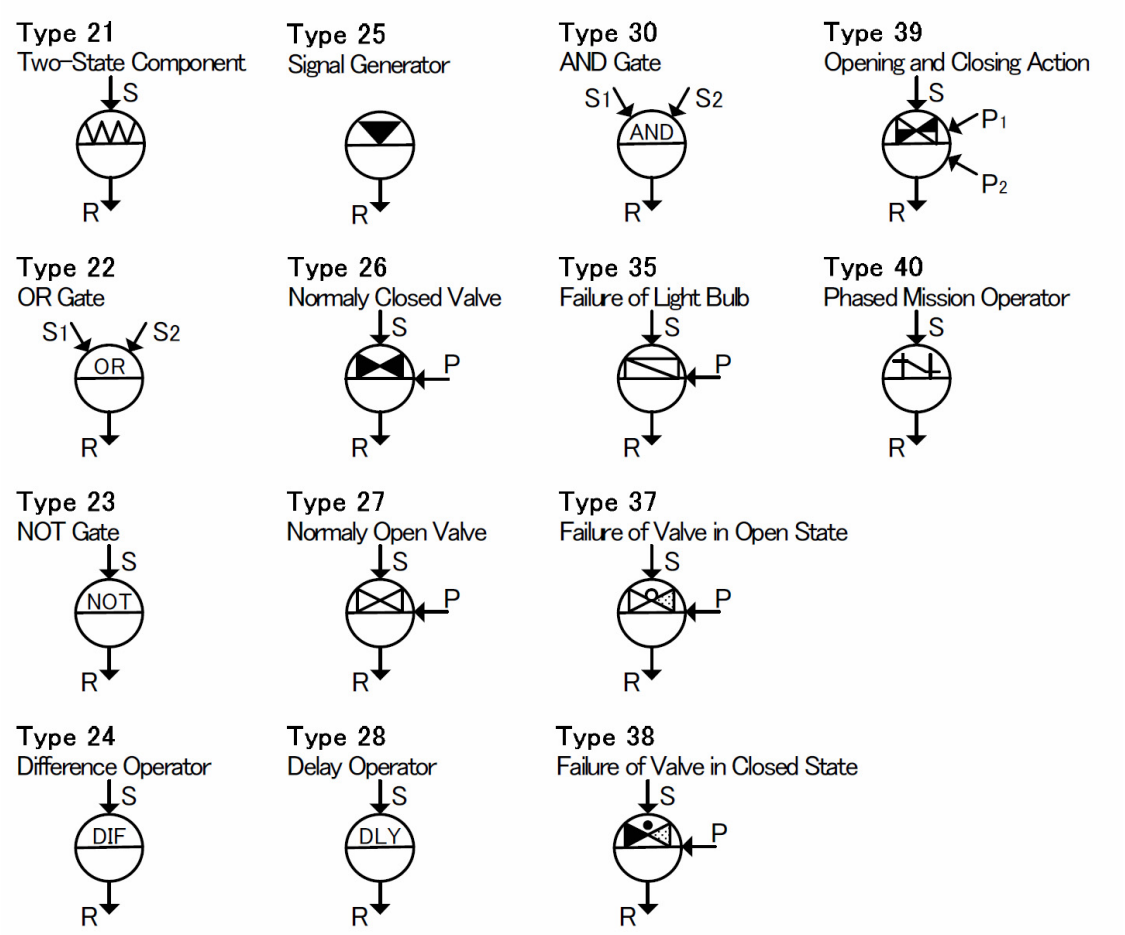

図 1.3.3 GO-FLOW オペレータ [9)]

各信号には、強度という量が伴っている。各入力信号は主として物理的な流れを表しており、強度は信号の存在確率に依存している。一方、系の動作の進行に対応して、離散的な時刻を示すタイムポイントが定義される。これによって、前後関係が時間の経過と共に変化する様子が表現できる。タイムポイントは、解析対象の動作モードを表すために必要な時間の区切りによって定まり、解析者が指定する。

このようにして各オペレータの動作を時間と共に追いかけ、システム全体がどのように動くかを知ることができる。

GO-FLOW 手法においては、時間経過に伴う信頼度の推移、要求されるシステム動作成功基準が変化する場合、補修による機器故障の復旧の効果、システム動作状況が機器状態、プロセス状態等により変化する動的システム解析等の種々の解析が容易に実施できる。

1．4 リスクベース保全

1.4.1 RBM、RBI

(1) RBM、RBI の歴史 [6)]

アメリカ石油協会(API)が 1996 年に石油産業設備を対象とした最初のリスク基準メンテナンス検査計画方法(RBI)を提案し、それ以降の欧州でも規格化の動きがあり、リスク基準メンテナンス（RBM）活動が盛んになっている。

RBM/RBI のガイドラインとしては、米国機械学会(ASME)及び米国石油学会(API)でガイドラインを作成している。ASME では 1980 年代後半からリスク評価の重要性が議論され、API と協調してガイドラインを策定してきた。ガイドラインとして「一般的な考え方」「軽水炉への適用」「火力発電設備への適用」の 3 巻が発行されている。

API では 1993 年に 16 社のスポンサーを得て RBI の検討を始めた。2000 年には 25 社が参加して総額 2 億円のプロジェクトとして RBI の具体的で詳細な実施方法を策定している。API RP 580 では、RBI は技術者、検査員、リスクアナリスト及びその他の人々の知識と経験に基づいて実施しなければならず、定性的 RBI 評価は経験的な判断が重要なファクターになるが、定量的評価では充分な情報量が必要になり、より詳細な解析が必要となる。API RP581 では、API580 で書かれているガイドラインに沿って石油・化学プラントの機器、配管耐圧部の RBI/RBM 評価手法として開発された。ここではより具体的に計算手法が記載されており、多くの人が使える形になっている。

一方、欧州においても 1990 年代後半から RBM についてガイドラインを作成することを目的として、欧州プロジェクトの RIMAP(Risk Based Inspection and Maintenance Procedure for European Industries)が立ち上がった。但し RIMAP はガイドラインだけでなく利用できるような方法、ツール、規格や基準なども取り込もうとしており、4 年間のプロジェクトで、先ず RBI/RBLM(Risk-Based Life Management)ガイドライン、利用の為のワークブックを作成し、次にそれを実際に機器に適用し、その情報を広めることとしている。

(2) RBM, RBI の概要

RBM では、リスクを破損の起こりやすさと被害の大きさの積と定義している [10)]。

リスク＝「破損の起こりやすさ」×「被害の大きさ」

すなわち、故障、事故など安全度をある境界を設けて「安全」と「危険」とに絶対的に区分するのではなく、リスクという量的な概念で捕らえ、安全と危険の大きさを連続した量として扱い、リスクの大きさによって危険度を評価するものである。

API によれば、リスクの評価方法には、3 つのカテゴリーがある [12)]。

レベルⅠ　定性評価

レベルⅡ　半定量評価

レベルⅢ　定量評価

定性評価では、発生確率とその影響度を、10 から 20 程度の質問形式のリストでチェックし、5 段階のマトリックスで表示する。発生確率はリストでチェックして発生の確率をランク付けする。影響度は、化学プラントであれば、可燃性或いは、爆発性、毒性など、事故がおきた時の影響の大きさに従ってランク付けする。

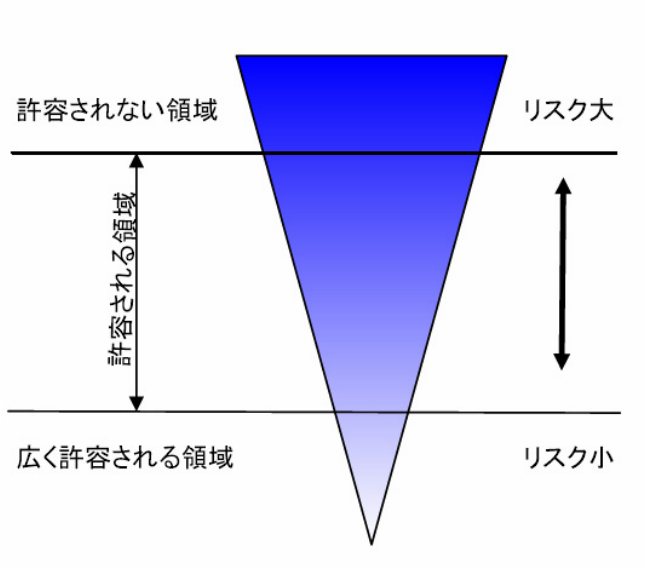

図 1.4.1 リスクの考え方

各々のランクに相当するマトリックス上の位置にプロットすることで、リスクの大きさが表現できる。標準的なものは図 1.4.2 のようなものである。

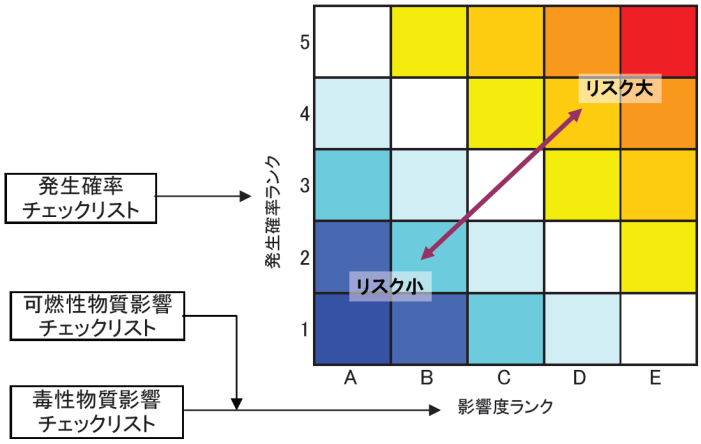

図 1.4.2 リスクマトリックス

半定量評価は、設備材料の減肉、割れなどの材質劣化そのほかの要素を評価して破損確率に織り込むテクニカルモジュールという手法で係数を決め、破損確率を 5 段階にランク付けする。影響度は、破損による漏洩量から拡散面積を計算して影響面積を決め、影響度を 5 段階にランク付けする。半定量評価も、定性評価と同様にマトリックスで表す。

定量評価は、機器の種類ごとに一般破損確率データが必要である。API では、一般破損確率のリストが用意されているので、これを使うことが出来る。これよりももっと信頼性がある最新のデータがあれば、それを使用する。これに、機器修正係数、管理評価係数などの補正係数で修正して、年間の発生確率を算出する。補正係数については、API のチェックリストの質問事項に答えるなどの方法で求められるようになっている。

年間の発生確率＝一般破損確率×機器修正係数×管理評価係数

一方、被害の大きさは内部流体が流出したときの被害の大きさと定義されており、流出速度や流出量を計算し、その事故結果を 4 種類のモデル(火災・爆発、毒性、環境汚染、事業中断)に対して評価する。これもステップごとに設問が用意されており、その設問に答えることで被害の大きさを算出できるようになっている。

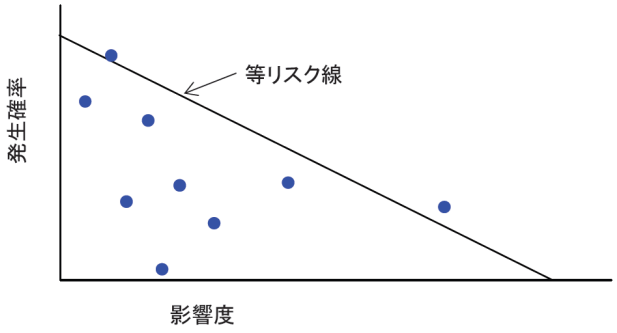

図 1.4.3 リスクプロット

定量評価の結果は、図 1.4.3 のようにプロットされることが多い。リスクは、等リスクラインを引いて、それぞれの評価結果がどのくらいのリスクであるかを目視でわかりやすくなる。

(3) RBM、RBI の特色と課題

RBM、RBI の手法を述べた、API580 は化学プラントに対する RBI 手法のガイドラインであるが、他の機種にも応用が可能である。但し、具体的な手順が示されていないため、汎用化するためには算定方法のフローチャート等を明確にする必要がある。API581 は、API580 よりも具体的にリスク評価手法が示されており、エンジニアにとって使いやすい形になっている。破損の起こりやすさについては、一般的な工業界でのデータを基にして一般の破壊確率を装置ごとに求めているが、汎用化のためには一般的な破壊確率を求めるのが非常に難しく、どのように算出するかが問題になる。被害の大きさについても石油・化学プラントを対象にしているため、汎用化する場合の被害の定義をどうするかが重要となる [6]。

RBM の特色は、リスク解析を行い、最もリスクの大きいものから優先順位をつけることができることである。これによって、リスクが大きいものに保全の努力を集中し、リスクの少ないものの保全費用を削減できることである。最終的には、経営資源の有効活用となるものである。わが国における安全性の議論は、ゼロリスクとして評価してきた習慣がある。このため、保全においては設計・建設時の性能を 100%保持する努力がされてきたが、劣化損傷による事故といっても、多大な損害をもたらすものとは限らない。そこで、その発生確率と、発生したときの影響をあわせて議論すると言うのがリスクベースの考え方になる [13]。

RBM の適用が効果的だったというイギリスの事例を紹介する。連続生産設備において、故障の 90%は特定の 10%の機器で発生している。このような設備に RBI を適用したところ、検査の総費用が 40～80%削減した。検査間隔は、35～57%長くなった(平均では 44%)。そして半分以上の機器が検査プログラムから外すことができた。著しい成功例は、顧客と共に行った事例である。RBI の適用前は、検査の処方と指示は、リスクが伴うかどうかに

関わらずはっきりしないものであった。実際、定修中に行った広範囲な検査で、何の劣化も発見されないことがあった。一方で、予期せぬ問題が起こり、緊急に修理せざるを得ない事態も起きた。RBI 導入後、この事例では、プラントの操業度は、年間 290 日から 310 日に、80%から 85%に伸びた。操業度延長の主要因は、定修期間を 35 日から 22 日に縮小できたからである[14]。

また、次のような例も紹介されている[15]。図 1.4.4 は、Risk-Based Inspection の考え方を採用して原子力発電所の検査箇所を削減した実例を示す。設備 1～5 のうち、いずれも検査箇所が 1/4 以下に削減されている。これはリスク管理工学の手法に従って、各主要機器の検査箇所ごとの定量的リスクを計算し、リスク積和により、リスク管理の見地から見た設備重要度分類により検査箇所を取捨選択した結果である。

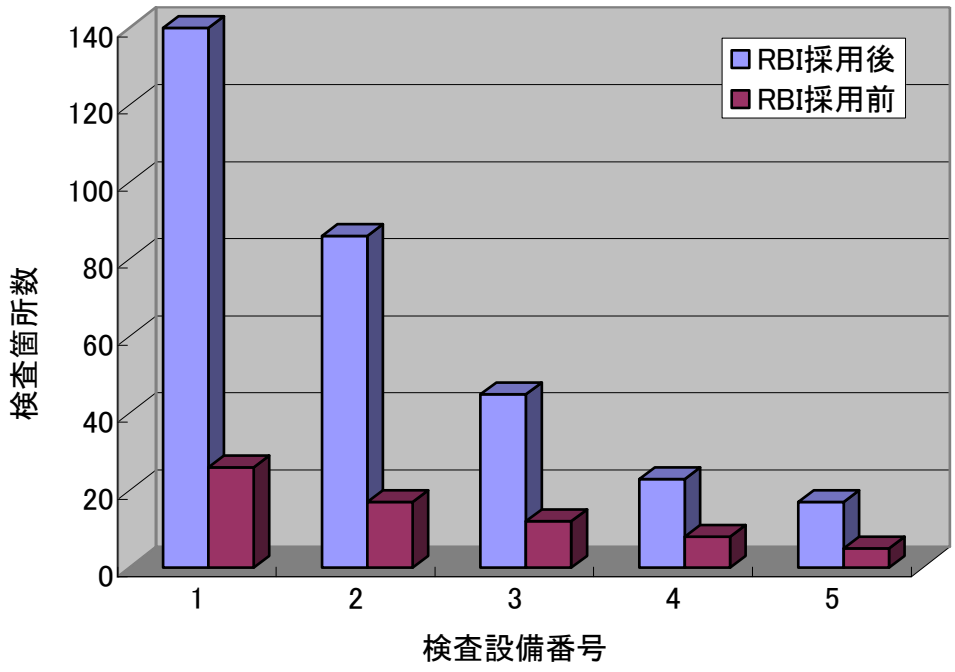

図 1.4.4 RBI による原子力発電所検査個数の削減の実例[15]

図 1.4.5 も同じ文献で紹介されているアメリカの原子力発電所における RBI による検査コスト削減効果である。対象設備 1 および 2 ともに検査コストが 1/3 以下に削減されている。

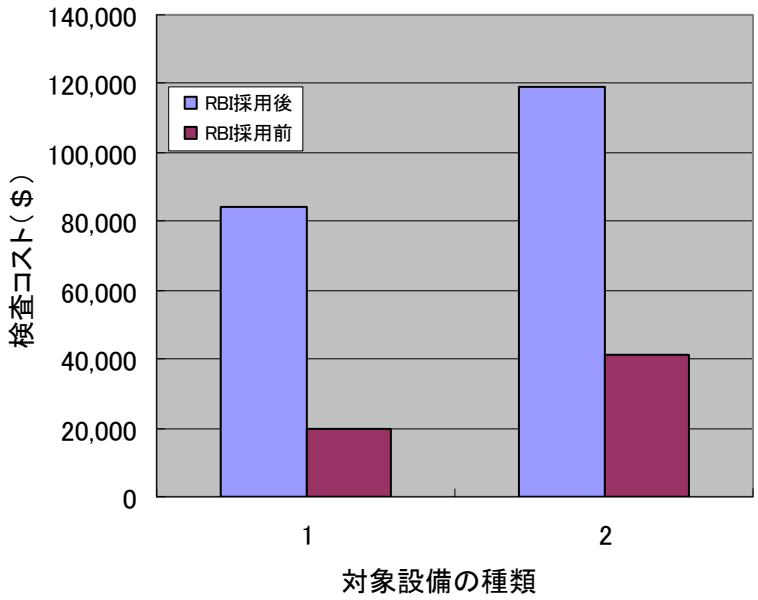

図 1.4.5 RBI による原子力発電所のコスト削減効果 [15)]

1.4.2 わが国での動向

わが国においても RBM に関心が高まり、2001 年には日本高圧力技術協会(HPI)に日本で最初の組織的な RBM 研究機能として「RBM 専門研究委員会」が発足した。2003 年度に第 1 回の研究活動委員会が開始され、その後、2004 年度から 2 年間第 2 期の委員会活動を、2006 年度から第 3 期の委員会活動が行われた。活動は RBI の概要をガイドラインの形でまとめることを目的とする WG-1 と、実際に RBM を適用する際の具体的な手法を示すハンドブックの作成を目的とする WG-2 に分かれた活動を行っている。

2004 年には、RBM 汎用化開発委員会が組織されて国産の汎用的な RBM ガイドラインの確立を目指して活動が行われ、「機械システム等のメンテナンス最適化のための RBM 手法の開発に関するフィージビリティースタディー」報告書－要旨―が出されている。翌 2005 年には、同名の報告書が発行されている。この報告書では、RBM に関する調査に始まって、システムの汎用化への検討、汎用的な RBM 基本設計、破損の起こりやすさのガイドライン、被害の大きさ算定ガイドライン、リスク評価ガイドラインなどが述べられている。更に、海外との連携なども調査されている。

2006 年には、化学工学会から「設備管理のための検査有効度ハンドブック」が出され、RBI をベースとした検査有効度の概念をわかりやすく解説し、検査有効度の表を作成するなどの活動を行っている。その後も材料セミナーなどで、リスク評価や検査有効度の研究発表などを行っている。

2008 年には、社団法人日本鉄鋼協会による研究発表の講座が開催され、RBM 関連の多くの講演が行われた。

日本では、RBI や RBM を直接導入したような規格はない。しかし、リスク及びリスクマネージメントに定義や規格はある [16]。図 1.4.6 は、ISO 及びそれに対応する JIS 等に規定されるリスクマネージメントに関する基本比較である。

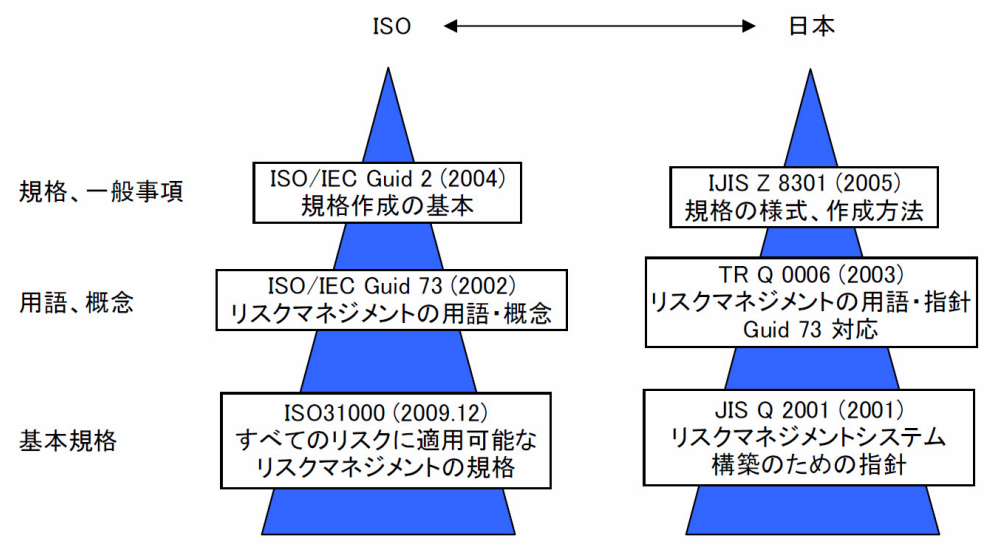

図 1.4.6 リスクに係る基本的な ISO と JIS 規格の体系 [16]

また、図 1.4.7 は、機械類の安全に特化して構築された ISO 規格の体系のうち、一部の規格を抜き出したものである。

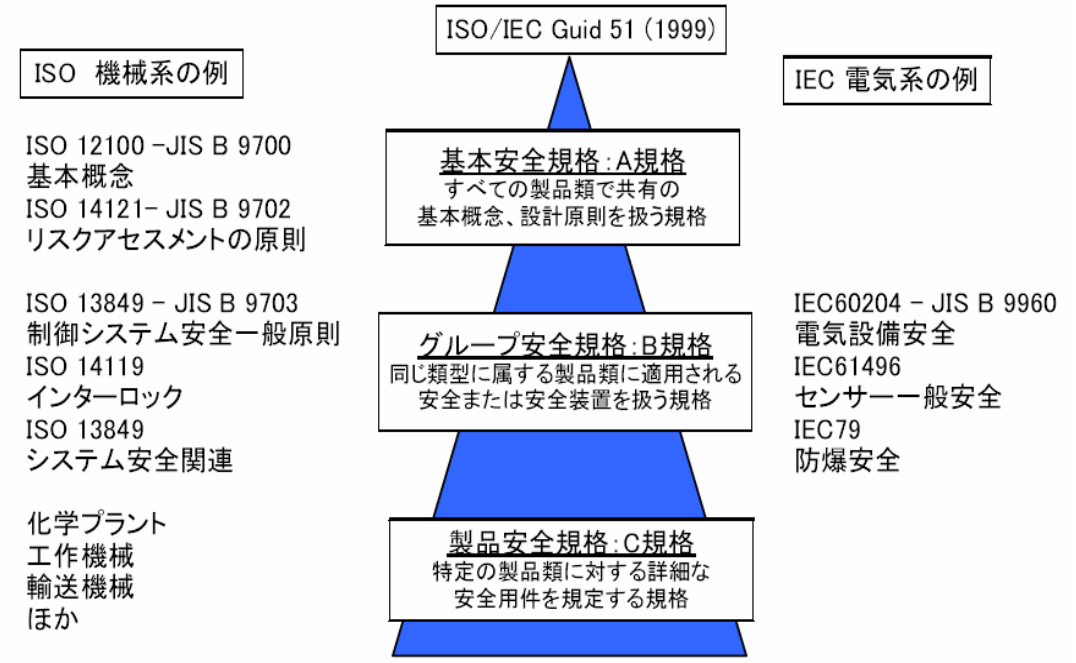

図 1.4.7 機械類の安全に関する ISO の構造 [16]

人と資産、環境及びこれらの組み合わせによる全ての安全に関わる規格である ISO/IEC Guide 51 (Safety aspects – Guideline for their inclusion in standards)の初版は 1990 年に発刊され、1999 年に改訂されている。一方、ISO/IEC Guide 73 (Risk management – Vocabularies - Guideline for use in standards)は一般的なリスクマネージメントの全てに適用される規格として 2002 年に発刊された。但し、Guide 73 には安全に関しては先行している Guide 51 を使うように注記されている。リスクの定義として Guide 51 では「危害(harm)の発生する確率と危害の深刻さの組み合わせ」であるとし、危害は「人の身体・健康が受ける物理的損傷、又は財産や環境が受ける損害」であるとしている。一方、Guide 73 の初版では、リスクは「事象の発生確率と事象の結果の組み合わせ」と定義されていたが、2009 年に発刊される第 2 版目では、「目標に対して不確かさが与える影響」と変更されるとのことである。

1.4.3 わが国における事例報告

わが国における RBM の適用事例はあまり多くないと言われるが、以下のような適用事例が報告されている[17)]。

産業用、自家発電事業用ボイラー　12 例
セメントプラント（キルン）
大型クレーン、アンローダ
二重殻 LNG 地上タンク
石油ガス(LPG)精製プラント
石油ガス(LPG)精製プラント基礎コンクリート
工場設備耐震補強の簡易評価
ガスタービン（静的部）
除雪車
ドック壁面コンクリート
船舶主機

(1) セメントプラントへの適用[18)]

わが国では、RBI/RBM は火力発電用ボイラーや石油化学プラントにおいて最適なメンテナンス計画が策定できる手法として注目されてきた。ここでは、火力発電プラント機への RBM 評価手法を適用した経験を基に、新たな展開としてセメント焼成プラントにおけるロータリーキルンのメンテナンス計画に適用した。

手法としては、まずシステムを階層化した目録を作成し、運転履歴、補修費、検査間隔、将来の運転計画などのデータを収集した。これらを基に、半定量リスク評価を行い、リスクマトリックス及びリスクカテゴリーを作成した。これらを基に RBM 評価を行った。解析

時点での経済的リスク評価結果は図 1.4.8 の様である。殆どの部位が条件付許容範囲以下であったが、要計画変更にランクされる部位が 2 箇所あった。

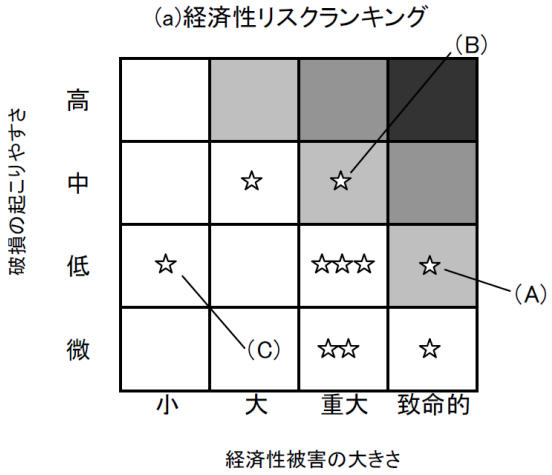

図 1.4.8 経済性リスク評価 [18)]

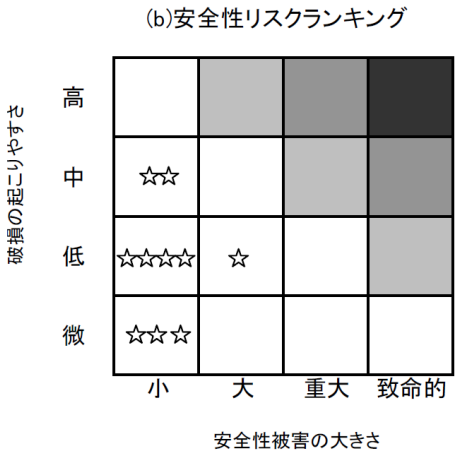

図 1.4.9 安全性リスク評価 [18)]

同様に、破損の起こりやすさと安全性についてリスク評価を行ったところ、図 1.4.9 のように全部位において安全性については許容可能であることがわかった。従って、リスクが厳しくなる経済性被害の大きさに注目して評価を実施した。これによって、高リスク部位に関しては対策を立て、低リスク部位には今まで実施してきた検査を省略するなど、全体的に合理的なメンテナンス計画を立てることができるようになった。

(2) 火力設備への適用 [19)]

国内火力設備の約 80%は運用 10 万時間以上の経年設備である。これら設備では運用条件が厳しくなり、部材の劣化損傷が加速する傾向にある。この中で長大な翼を有する高速大回転体である低圧タービンは、蒸気タービンの性能と信頼性を決定づける重要機器である。経年低圧ローターでは、腐食による損傷事例が多くなってきている。この蒸気タービン低圧ローター故障確立に基づく信頼性評価と保全の経済性を考慮したリスク評価を行った。

経年低圧ローターの保全シナリオは、

①低圧ローターの一括更新

②補修の例として CCB 新構造翼と当該部のスキンカット

③ベースとして保全なし

の 3 通りを考えた。

上記のシナリオに対する故障確率と、損害から、保全なしを基準とした費用と利得の関係により、時間価値を考慮して正味現在価値(NPV)を算出した。この結果、低圧ローターは故障確率が高いことから、補修による保全に比べてローター一括更新の方がリスク評価の観点から有効な保全対策であったことがわかった。この結果によって、経年設備に対する

保全シナリオが、設備の更新を含めて評価することができる。

(3) ボイラー設備への適用 [20)]

石油化学、無機、有機化学の分野でのプラントのトラブルを機器別、要因別に解析した結果は、API の調査結果とほぼ同じ傾向を示した。RBI に基づくリスクマトリックスを作成し、評価を行った。対象は、可燃物保有機器と、毒性物質保有機器である。これらについて、まず漏洩発生確率と影響度の計算を行った。この結果、毒物を扱う機器は、漏洩の発生は低いが影響度が非常に高いことが明らかになった。毒物は、可燃性物質に対して影響度が 1,000 倍程度と非常に大きくなるため、検査の改善はリスク低減に寄与せず、漏洩時の拡散防護処置のみが有効になる。故障の発生頻度と影響度の関係をグラフ上に図示したところ、現在の管理・検査のレベルで、検査周期を延長しても問題がないことが判明した。図にプロットすることで、各設備のリスク担保量の大きさやリスクを最適化するために、いずれの要因について手を打つかなどの対応が視覚的に良くわかる。

１．５　故障物理に基づく設備管理技術

1.5.1 LEAF の概念

(1) 基本的な考え方

LEAF(Life-span Estimation Analysis based on Failure mechanisms)は故障メカニズムに基づく寿命予測手法である。生産設備の多くは「複数の機能を持つ部品の集合体」「各種部品に対して様々なストレスが働く」「故障は１次故障、２次故障、波及故障と関係が複雑になっている」等の特徴を持っている。LEAF は、故障メカニズムが複雑なものに対して、機能面から整理することで故障物理を明確にする。これは RCM で採用されている故障分析手法である FMEA と非常に似ているが、FMEA は対象とする設備の論理ブロック線図をつくり、それぞれの要素について故障モードを想定し、その影響が伝搬する過程を追及して危険性を確率的に評価する方法である。影響は非常に広範になるので何処まで展開するかによって危険の範囲が異なる。過去の故障履歴などの限られた情報から分析するにとどまっている。これに対して、LEAF は部品を起点に機能を明確にして機能に対するストレスを考え、各々の部品のストレス毎に故障を考えて寿命予測の精度を上げていくシステムである。

(2) LEAF を利用した合理的設備管理の有効性

LEAF は想定されるトラブル、過去の事故やトラブル事例を網羅的に設備管理に活かす手法でもある。現在までの設備事故の原因解析をすると大きく 4 つの原因、すなわち、設計不良、製作・施工不良、運転条件逸脱、経年劣化に集約される [30]。過去の事故を見ると明白なミスが原因となった事故であっても結果が出るのは長期間の運転後であるという例が多く、劣化のメカニズムと共に劣化速度を考慮に入れる必要がある。LEAF を用いればこれらの原因による事故をどれだけなくせるかについてまとめたのが表 1.7.1 である [23]。ここに示すように LEAF を設備管理手法として活用することにより今まで想定もされず、且つ、誰も経験しなかった故障のみが残るという結果になる。

表 1.5.1　LEAF の有効性 [23,24]

故障原因	LEAF の有効性
設計不良	設計に戻っての要再チェック項目が明確になる。
製作・施工不良	製作・施工不良から発生する故障も網羅されている。
運転条件逸脱	変更の際のチェックポイントが明確になる。
経年劣化	想定される劣化の網羅ができる。過去の事例に基づく網羅ができる。
想定もされない、且つ、過去に経験されていない故障だけが漏れるのみ	

対象とする機器について LEAF の構成因子を一覧表に示したものを LEAF シートという

が、LEAF シート作成のためには機器、部品毎、使用環境毎の詳細にわたる分析と劣化メカニズムの解析が必要で、この作業に専門家の多大なマンパワーが必要となる。しかし、一度作業をしてそれが出来れば非常に汎用的でありながらなおかつ自社の機器特有の特徴を組込んだ LEAF シートを作成することができる。

1.5.2 LEAF の方法

(1) LEAF 手法のステップ

LEAF 手法は故障メカニズムに基づく寿命予測である。その手法はつぎの 4 つのステップから成り立つ。

①部品と機能の明確化とストレスの把握

②ストレスから故障へのメカニズムの明確化

③劣化予測手法の検討（検査手法、検査時期）

④寿命予測

機器を部品単位まで展開し、部品と機能との関連を整理し役割を明確にする。これにより部品に対する機能を阻害する要因（即ちストレス）を想定することで劣化モードを検討・推定することが可能となる。

LEAF シートの作成はストレスから出発し、劣化モードの推定、故障に至までの過程を整理することで故障発生のメカニズムを時系列に考えることができる。このため、知見の共有、保全技術の体系化に効果がある。故障メカニズムを明確にすることで、ストレス毎の劣化モードを理解し、管理すべき項目の決定が可能となる。

(2) データベースの全体構造

LEAF の実行にはあらかじめデータベースを用意しておく必要がある。このデータベースは、①機器機能展開データベース、②ストレス系データベース、③劣化モードデータベースから構成される。これらは、それぞれ独立なデータベースとして存在する。機器機能展開データベースは機種毎に準備するものであり、このデータベースを充実しておけばその後の作成の手間を大きく省くことができる。劣化モードデータベースも同様に予め準備するデータベースである。ストレス系データベースは設備ユーザ側の特有の機器設計条件や使用条件・環境条件によるものであり、設備ユーザで準備する必要がある。このデータベースは詳細なデータを必要とするので、このためにデータを集める、あるいは測定するなどの設備ユーザ側の手間を最小限にする工夫が必要である。LEAF シートを完成するためのステップとこれらのデータベースの関係を図 1.5.1 に示す。

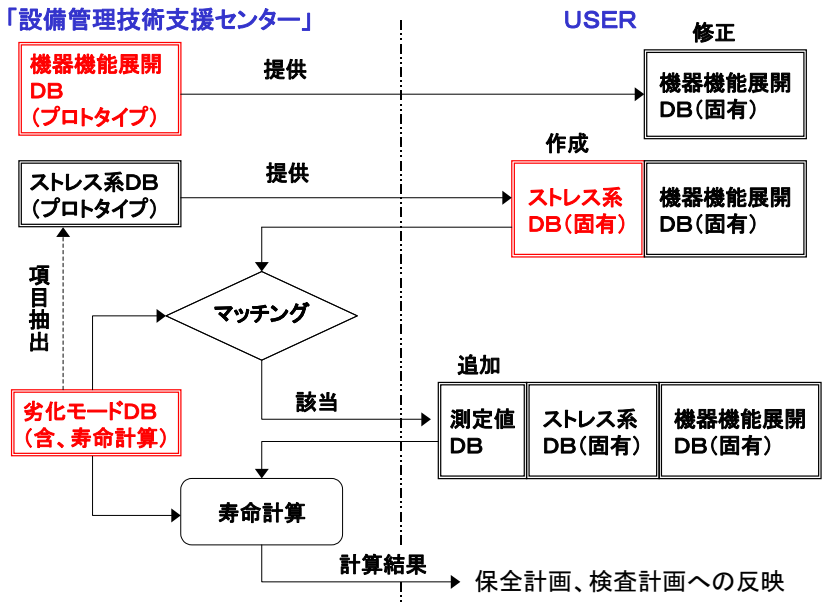

図 1.5.1　LEAF シート作成手順とデータベース関連図 [25)]

(3) LEAF の具体的な手順

①機器機能展開図の作成

機器機能展開図は、機器が要求される機能の集合体と捉え、機器を構成する部品の機能が阻害された状態（故障）を想定するために、機器・部品に対して要求される機能をもれなく抽出･識別する。具体的には図 1.5.2 の例のように機器の機能と部品の関係を整理し、機能毎に機器を構成する部品を分類・整理することが行われる。また、部品の他に部位についても機能展開することが必要である。配管の例を図 1.5.3 に示す。

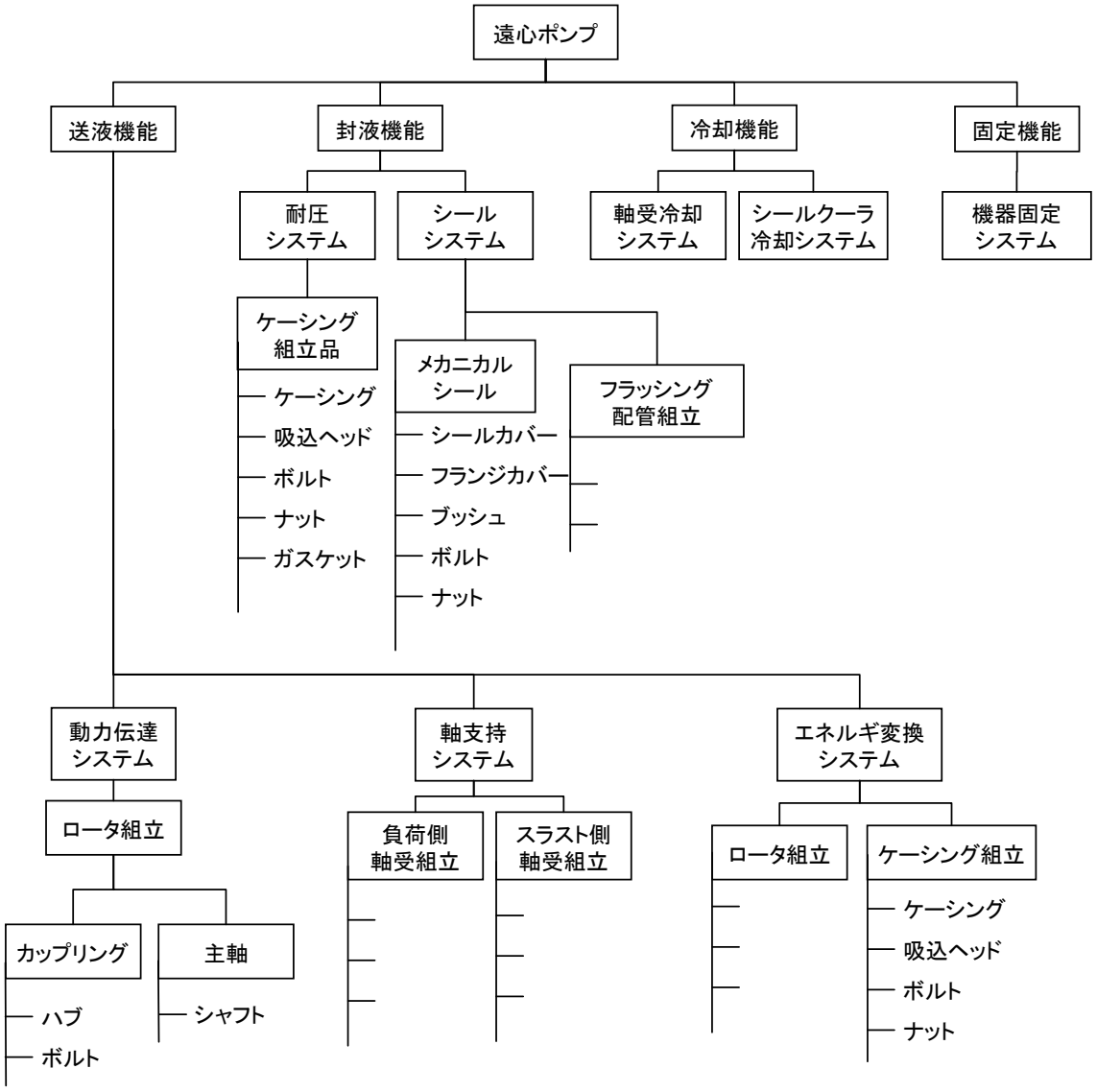

図 1.5.2 部品機能展開図 [23)]

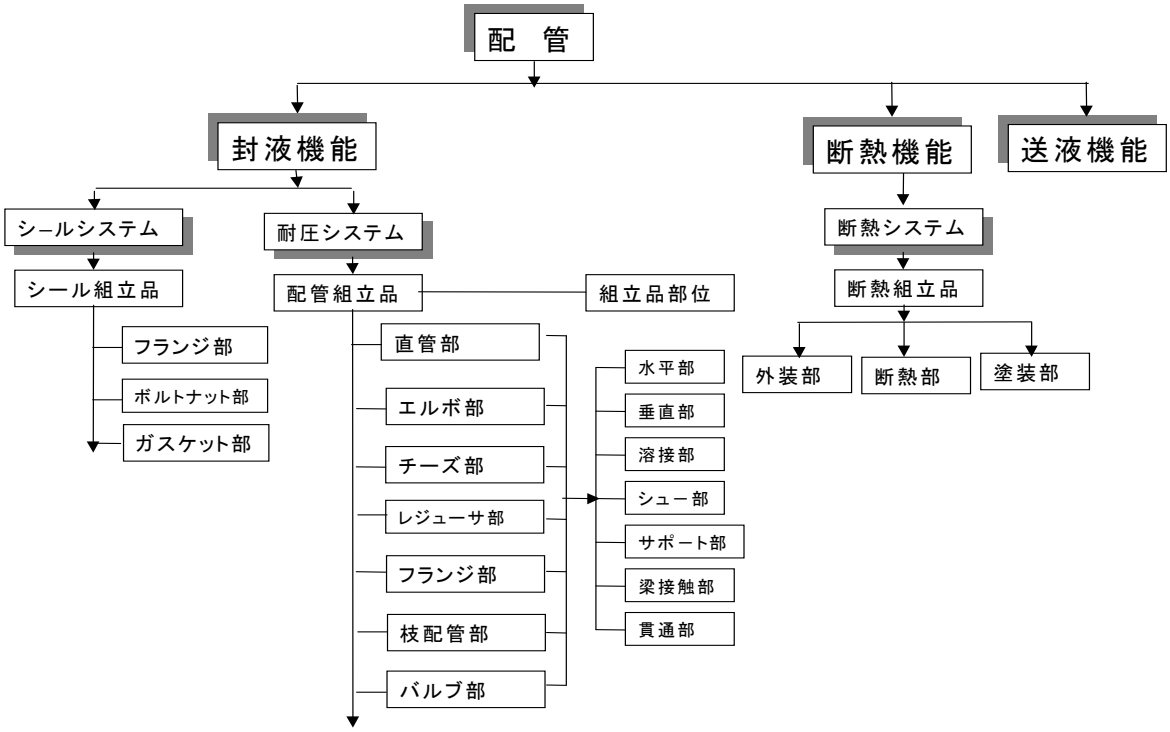

図 1.5.3　機器機能展開の例 [23)]

②劣化モードの抽出

機器機能展開では、機能によって部品・部位レベルまで機器が分解されたが、このレベルにおける劣化モードを抽出することが必要である。劣化モードは部品・部位が置かれた流体や温度などの環境条件との関係できまるが、一般には複数の劣化モードが存在する。

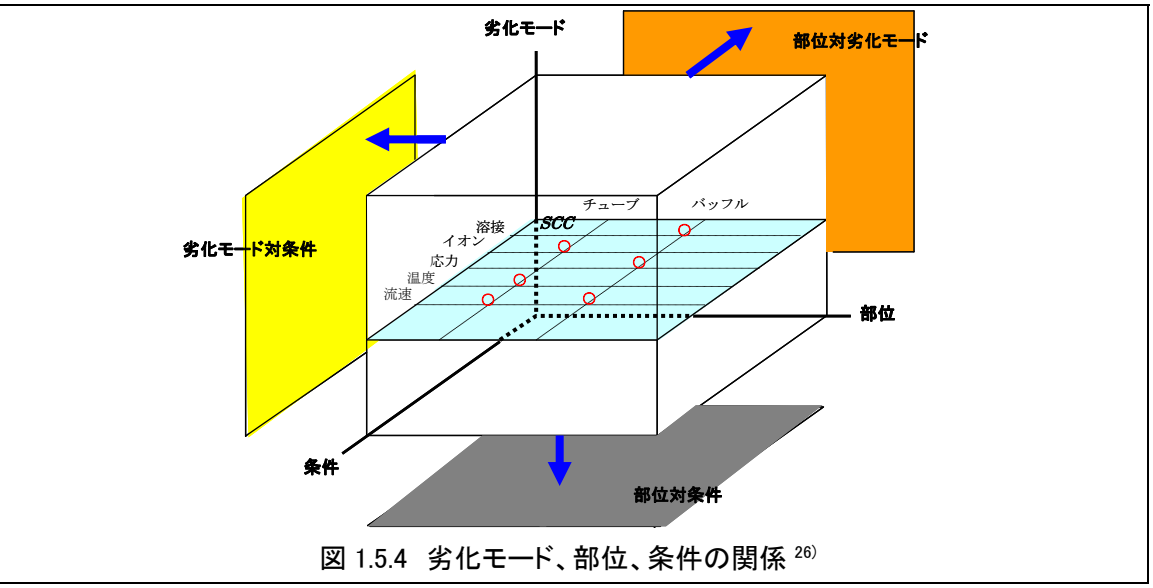

図 1.5.4　劣化モード、部位、条件の関係 [26)]

この関係を図 1.5.4 に示す。予め作成された劣化モードデータベースから、対象となる劣化モードを抽出する。

対象機器について故障メカニズム図を作成することができる。この故障メカニズム図は LEAF シートに記載される故障モードとストレス要因の記載を補完する役割を持っている。一般的に故障メカニズムを整理する場合には､部品の故障モードから故障に至るプロセスを作成するが、LEAF の場合には部品・部位の持つ機能を阻害するストレスから故障に至るメカニズムを整理することが特徴である。部品のストレスから故障を時系列に並べ、その因果関係を把握することができる。

③寿命予測と LEAF シートの作成

機器機能展開図を基に各部品・部位について、ストレスから故障の関係を整理し、故障モード、劣化モード及びストレスから「対象モード」（寿命予測の際に着目するモード）を選択する。この対象アイテム毎に現状において可能な寿命予測手法の絞込みを行い、寿命予測に必要なパラメータ、測定方法と時期について検討する。LEAF シートは部品・機能・ストレスなどの要因を整理し、対象モード・寿命予測方法・パラメータ・測定法を整理できる。

表 1.5.2 LEAF シートの例 [23)]

機能展開			部品名		故障モード		劣化モード	ストレス因子			対象モード	寿命予測法	パラメータ	測定法	測定時	
回転機械	機能	システム			機能故障	現象（症状）		運転中	分解点検時	製作時					運転時	
遠心ポンプ	封液機能	シールシステム	メカニカルシール組立品		異常摩耗	ドライ潤滑	潤滑不良	圧力低下 温度上昇			摩耗	摩耗速度	摩耗量	マイクロメータ	－	
				スロートブッシュ	摩耗	接触	接触	振動（変位） 振動（変位） 異物	組立不良		摩耗	摩耗速度	摩耗量	マイクロメータ	－	
					漏洩	シールボックス圧低下	摩耗	摩耗			摩耗	摩耗速度	摩耗量	マイクロメータ	－	
				ガスケット	漏洩	面圧低下	材質劣化	温度			材質劣化	試験データから推定	温度	温度計	○	
				ボルトナット			ボルト緩み	クリープ 振動（変位）	締付不良		ゆるみ	トレンドから推定	締付トルク	トルク測定	－	
							ボルト破断	ボルト破断								
					ボルト破断	亀裂	疲労亀裂	繰返し応力 応力集中 応力集中	傷	傷	き裂 疲労	き裂進展解析 点検交換 発生可能性の想定	き裂深さ 応力振幅 周波数	非破壊検査 軸振動計	－ ○	
							SCC	温度 液質 応力		材質 残留応力	SCC き裂	発生可能性の想定 き裂進展解析	液質 き裂深さ 応力	液質測定 非破壊検査 残留応力測定+FEM	○ － －	
							延性亀裂	過大応力 強度低下			き裂	き裂進展解析	き裂深さ 応力	非破壊検査 残留応力測定+FEM	－ －	
							脆性亀裂	衝撃応力 脆化			き裂	き裂進展解析	き裂深さ 応力	非破壊検査 残留応力測定+FEM	－ －	
				補助シール	漏洩	隙間拡大	摩耗	摺動摩擦	組立不良		摩耗	摩耗速度	摩耗量	マイクロメータ	－	

1.5.3 設備管理技術開発センター（LRDC）の取り組み

LEAF を採用した設備管理技術開発センター(LRDC : LEAF Research and Development Center)の取り組みを紹介する [27,28,29]。

(1) 概況

設備管理には事故、突発故障を無くして保全費用をミニマムとすることが求められているが、LRDC は LEAF を用いた部品・部位レベルの寿命管理によって合理的な設備管理を行うことを目指している。目標は、事故の未然防止と設備保全費のミニマム化であり、機器全体の機能を損なうことなく、現在の時点でクリティカルとなる機器を抽出する。これに対してメンテナンスを行う。機器の機能展開を行って、管理の対象を部品・部位レベルまで掘り下げる。これらの部品・部位レベルについて使用条件を入れ、全ての劣化モードを検討する。現在の重要な部品・部位について抽出し、保全カレンダーに記入して管理する。

LEAF は事業所で保有し日常的な LEAF による管理は事業所で行うものであるが、そこでは解析やデータが十分でないので、LRDC がサポートする。LEAF の PDCA では、P は予測、すなわち部品･部位レベルの寿命予測をすることであり、プラントの環境や条件が異なるために個別の条件で予測を行うこととなる。予測結果が外れたら修正を行うことや途中で検証することも必要である。各事業所は、独自のデータで LRDC にアクセスすることが必要で、そこでは他社データもあるので精度をあげることができる。PDCA はフィードバックではなくフィードフォワードであることが特徴である。

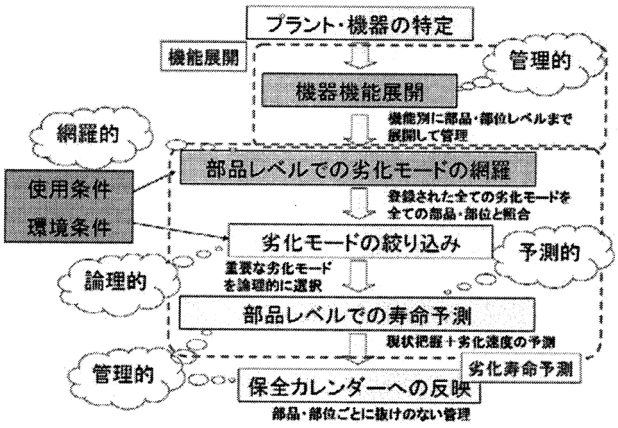

図 1.5.5 LEAF の流れと特徴 [5]

LRDC は 2004 年に設立準備会が発足し、2006 年に正式に発足した。当初、熱交換器をテーマに選定し、現実に使用可能なシステム開発を行った。現在は、配管腐食を開発中であり、今後は回転機器の開発を行う予定である。また、大学に故障物理に関する研究委託を行うことも進めている。この取り組みは、一企業では困難で、寿命予測、機能展開を行

うことができない。IT ツールを開発することも必須であり、業界共同でスタンダードをつくることを目指している。会員は LRDC の開発チームと合同でシステムを利用する。LRDC では会員各社のデータを持ち寄って解析を進めている。

機器機能展開においては、例えば熱交換器の場合、密封、伝熱、流体輸送などに分解し、部品によってどの機能が損なわれるかを見ることが重要な着目点であり、耐圧機能はシール機能の一部であるように機能はモジュール的な構造となっている。このため機器機能展開は負荷のかかる作業である。

熱交換器の機器機能展開は、TEMA のモデル型式に基づいてシステムが自動的に部品展開する。チューブ側は入口、出口に特有の劣化があるので、部位まで展開する。劣化モードは局部腐食なら材料、流体の掛け算となる。炭素鋼で淡水系なら全面腐食、局部腐食、エロージョン、エロージョン・コロージョン、などだが、多くは無い。また、劣化モードは、一次スクリーニングのためにランク分けされる。ひとつ一つの劣化モードについて、特性因子を加えたプロセス条件を入れて評価を行う。データを入れると定量的な結果が得られる。今後は既存の定量的なデータを加えて精度をあげる予定である。流体は石油、エチレンなどのプロセスデータを入れて解析できるようになっている。

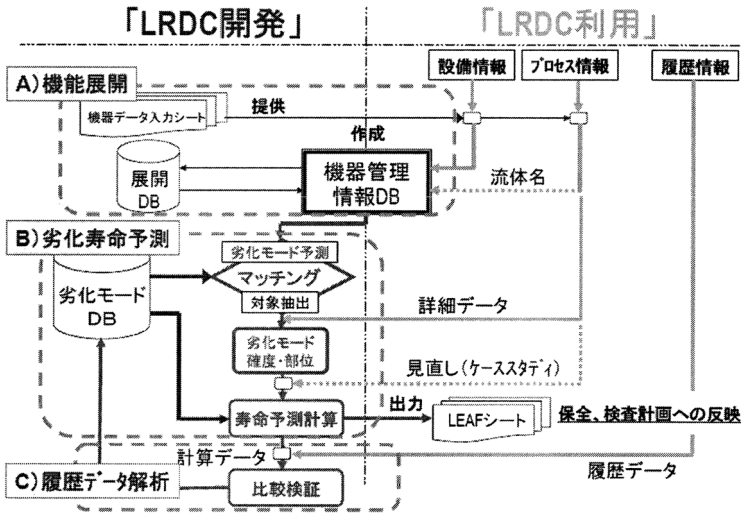

図 1.5.6 LRDC と利用者における LEAF の流れ [27)]

(2) LRDC の役割と有用性 [23)]

今後の設備管理では損傷劣化予測技術の構築が重要な位置を占めているが、それを実現するために、設備産業が一丸となって情報と技術を集約できる場の設立が一つのソリューションとなり得る。また、設備管理の新しいビジネスモデルとなることも示唆される。具体的に LRDC の果たすべき主要ミッションとして、次の 2 項目が重要であるとしている。

①会員企業の保有する設備に対して、設備固有の設計・製作条件や運転条件に基

づく寿命予測データの提供をすること

②寿命予測の精度を高めるための新予測技術の開発を行うこと

また、LRDC を実現させるための運営に関する必須条件としては、以下があげられている。

①参加企業間で LRDC から受けるサービスに対する対価、および寿命予測の新技術開発に対する貢献度に応じた報酬について明確なコンセンサスが存在すること

②データ提供企業がそのことによっていささかの不利益も被ることのない情報のセキュリティが確実に確保されること

③LRDC の提供する寿命予測データについて LRDC の負う責任について会員企業との間に正確な理解が存在すること

(3) LRDC の情報サービスとして求められるニーズ [23)]

LRDC に対して具体的にどのようなサービス（アウトプット）が必要とされるか、また可能と考えられるかについては、以下の項目に集約されている。

①寿命予測に立脚したメンテナンスによる過剰メンテナンスの排除

②運転条件等の変更管理

③プラントスタートアップ時のメンテナンスポイントの選定

④事故事例のフォローアップ

a)クライテリア、スタンダードの変更への対応

b)更に精緻な劣化メカニズムへの対応

⑤設計の再チェック

a)設計範囲を超えた条件に対する異常発生予想

b)詳細解析結果の運転への反映

⑥生産管理情報の提供

この LRDC に期待されることは単に一企業の受けるメリットに止まらず、設備ユーザ企業群の設備管理技術レベルの向上により保安事故の削減によって産業の社会との共生という点からも意義あるものと考えられる。

(4) 実用化を推進するためのステップ [23)]

実用化の推進のためには以下のステップが必要である。

①機器機能展開データベースの充実

②劣化データベースの作成

③ユーザ対応のシステム開発(マン・マシーン・インターフェイス)

④セキュリティーシステム開発

劣化データベースは劣化因子と劣化モード、故障モードを関連付けるものである。余寿命予測には、劣化モード/メカニズムが明確に把握、整理されていることが不可欠であり、この劣化データベースの充実が LEAF を活用した設備管理の成否を決めるキーポイントと言える。劣化データベース構築上、故障と劣化を以下のように定義付けている。

故障：機能損傷と部品故障で定義する。機能故障は、機能展開で定義される機能を損なうことであり、部品故障は機能故障を起こすための部品の損傷とする。

劣化：故障を起こすための原因と定義する。医学との類推で考えると、劣化は病気であり、故障は症状に対応する。

劣化モードについては機種・機能別に多くの劣化メカニズムが存在する。設備ユーザが必要と思う劣化メカニズムについて、その劣化メカニズムの名前、発生する部品・部位、検討すべきかどうかを判定するクライテリア、劣化メカニズムを起動・加速させる因子、劣化の進む速度とその誤差の範囲等の寿命予測に必要とされる情報を整理する必要がある。更にこの整理された情報をコンピュータで使える形にするに際してはもう一度情報を整理し、必要ならば実験を追加して確かめることや多くの企業での経験値等を整理し直すなどのマンパワーが必要となる。

劣化モード/メカニズムに対して、モニタリング、余寿命予測が実施され予防保全が計画されるので、劣化データベースを作成する上で、劣化モードを網羅的に洗い出し、そのメカニズムを整理し、信頼性の高い技術情報を収集することが必要である。この作業の遂行には、高い専門性を持ったスペシャリストが求められる。

１．６ まとめ

(1) 事後保全から予防保全

従来は、設備は故障したら修理すると言う考え方が一般的であった。この方法を事後保全(Corrective Maintenance あるいは Breakdown Maintenance)と言う。道路、建築物など、そうした対応で問題がない場合もある。保全コストとしては、この方法が、寿命が尽きるまで使用するので、最もコストがかからない。設備が大型化し、生産システムが複雑になるにつれて、設備の故障によって生産が停止、または操業度が下がることが大きな損失につながるようになった。そこで、故障による稼働率の低下を回避するために提案されたのが予防保全(Preventive Maintenance)である。この方法は、部品が寿命に達する前に交換するので、交換時期を何時にするかが問題となる。

(2) 信頼性中心保全(RCM)

1960 年代に、アメリカでは航空機の大型化と整備量の増大によって、どのようにして航空機の安全を確保するかが大きな問題になった。事故は、必ずしも設計の問題ではなく、保守方法の不適切によるものが少なくないことから、新しい保全技術の体系を確立する必要があった。そこで 1965 年、アメリカ航空連邦局、ユナイテッド航空、ボーイング社の 3 者で新しい保全の体系が検討された。その成果が MSG-1, MSG-2, MSG-3 として発表された。これらは、ボーイング 747、ロッキード 1011、ダグラス 10 の時間計画保全に活用された。これらの手法を活用して、信頼性中心保全(RCM：Reliability Centered Maintenance)方式が航空機分野のみでなく、発電所、建築システムなど様々な分野で活用されている。

(3) 危険度評価法の試み

設備の安全を確保し、事故･故障を未然に防ぐために、設備にどういう危険が含まれているか、内在する危険を知ることが重要である。内在する危険、及びその程度を前もって知るために、いくつかの手法が開発され、使用されてきた。

1960 年代から開発されてきた信頼性解析の方法のひとつがフォールトツリー解析(FTA：Fault Tree Analysis)である。頂上事象と呼ばれるシステムの特定の故障、事故などの結果に対して、基本事象と呼ばれる、統計的に独立と考えられる故障原因などの要素との関連を、主に論理的 AND と論理的 OR で表される図的に表現したものを FT(Fault Tree)と呼ぶ。FTA は、1961 年にアメリカのベル電話研究所においてミサイル打ち上げ制御システムの安全性解析に用いられたのを初めとして、主にシステム安全工学技術者によって開発されてきた。その後、航空機、各種交通システム、原子力発電プラント、化学プロセスシステムなど、大規模システムの安全性、信頼性解析の方法として大きな成果を上げるようになった。

イベントツリー解析(ETA：Event Tree Analysis)は帰納的な論理図である。ある初期事象

から出発して、色々なシーケンスをとることにより、どのような状態になるかを明らかにするものである。ETA は、ちょうど FTA と逆の方向に、初期の事象がどのような結果になるかを求めるものである。

HAZOP は、1974 年にイギリスの ICI 社が自社の化学プラントの安全性評価を目的に開発した手法で、この手法は、プロセスプラントの計画段階、設計段階、建設段階、供用開始後の運転段階などいずれの段階でも実施可能な手法であり、安全性及び運転操作性の観点から設計内容を確認する手段として使用されている。プロセスシステムの設計又は運転に際して設定されている基準となる条件からのずれ(Deviation)に注目して、このずれの発生する原因とその影響を調査して、その対策を検討するものである。

故障モード影響解析(FMEA : Failure Mode and Effects Analysis)は、1960 年代中期に航空産業において公式適用された信頼性予測技術の一つであり、もし、ある事象が発生したらどうなるか、と言う答えを与えることができる帰納的解析手法の一つである。この目的を達成する為に、システムの各要素の故障モードを残らず列挙し、その故障モードが発生した場合に、システムや機器にどのような影響を与えるかを解析する。そしてその故障が発生する原因、故障がシステム機器や運用する人間に及ぼす危険や故障検知方法などを検討し、信頼性を損なう可能性の大きい故障モードを未然に除去する方法である。

従来、システム信頼解析法としてフォールトツリー解析が主として用いられてきたが、近年動的な解析のための手法が必要とされ始めた。システム信頼性解析手法の一つである GO-FLOW 手法では、時間依存性の解析、複雑な動作モードを持つシステムの解析、動的システムの解析など、フォールトツリーにない優れた機能を持つといわれる。

(4) リスクベース保全

アメリカ石油協会(API)が 1996 年に石油産業設備を対象とした最初のリスク基準メンテナンス検査計画方法(RBI)を提案し、それ以降の欧州でも規格化の動きがあり、リスク基準メンテナンス(RBM : Risk Based Maintenance)活動が盛んになっている。RBM では、リスクを破損の起こりやすさと被害の大きさの積と定義し、故障、事故などをリスクという量的な概念で捕らえ、安全と危険の大きさを連続した量として扱い、リスクの大きさによって危険度を評価するものである。RBM の手法は、リスク解析を行い、最もリスクの大きいものから優先順位をつけることができることである。これによって、リスクが大きいものに保全の努力を集中し、リスクの少ないものの保全費用を削減できることである。最終的には、経営資源の有効活用となるものである。アメリカなどでは、RBI を適用することによって、保全回数、保全コストが大幅に削減された例などが紹介されている。

日本においても RBM に関心が高まり、2001 年には日本高圧力技術協会(HPI)に日本で最初の組織的な RBM 研究機能として「RBM 専門研究委員会」が発足した。2006 年には、化学工学会から「設備管理の為の検査有効度ハンドブック」が出され、RBI をベースとした検査有効度の概念をわかりやすく解説し、検査有効度の表を作成するなどの活動を行っ

ている。わが国では、RBI/RBM の事例はそう多くないといわれているが、いくつかの例を紹介した。

(5) 故障物理に基づく設備管理技術

LEAF は故障メカニズムに基づく寿命予測手法であり、部品・部位を起点に機能を明確にして機能に対するストレスを考え、各々の部品・部位のストレス毎に故障を考えた上で寿命予測の精度を上げていくシステムであることが特徴である。ここでは設備を機能展開し、各構成要素に対して特定の劣化がどのようなメカニズムで進展するかを故障物理によって想定し、保全カレンダーに反映する仕組みで設備管理を行うものである。膨大なデータ入力を避けるために設備を型式分類することで機能展開の自動化部分を増加させることや、劣化モードの適用をデータベースから自動検索し数学モデルを適用することでより高度な余寿命計算を行う。熱交換器などを対象として LEAF を利用した設備管理の研究開発が行われ、システムの実用化が進められている。

参考文献(第 1 章)

1) 大島榮次監修 :「設備管理技術事典」第 1 章, (株) 産業技術サービスセンター, 2003

2) 豊田利夫 : KME 2006 年度　設備技術診断セミナー, 2007

3) 豊田利夫 : 最新保全技術研究会　第 I 期報告書, 日本プラントメンテナンス協会, 2006

4) 松浦房次郎他 : 環境の管理, 第 25 号, p9-15, 1999

5) Mohammad Modarres at al. : Reliability Engineering and Risk Analysis, Marcel Dekker, Inc.1999

6) 機械システム振興協会 : 機械システム等のメンテナンス最適化のための RBM 手法の開発に関するフィージビリティースタディー, 2003

7) 松岡猛他 : FMEA (故障モード及び影響解析) 実施手順, 海上技術安全研究所報告, vol.6, No.2, p1-37, 2006

8) 真壁肇 :「信頼性工学入門」第 3 章, 日本規格協会, 2003

9) http://www.nmri.go.jp/safe/director/mats_j.html

10) 財団法人機械振興協会　経済研究所/財団法人エンジニアリング振興協会 : 産業資本施設メンテの投資効果評価手法に関する調査研究, 2008

11) 柴崎敏和 : 第 12 回材料セミナー「化学設備のリスク評価と RBM の基礎と応用」, 化学工学会関東支部, 2008

12) 化学工学会 : 設備管理のための検査有効度ハンドブック, 2006

13) 酒井潤一 : 第 12 回材料セミナー「化学設備のリスク評価と RBM の基礎と応用」, 化学工学会関東支部, 2008

14) Tony Musgrave：ABB Review, 2003
15) 豊田利夫：最新保全技術研究会, 第 I 期報告書, p9, 社団法人日本プラントメンテナンス協会、2006
16) 石丸裕：白石記念講座, (社)日本鉄鋼協会, 2008
17) 富士彰夫：第 12 回材料セミナー「化学設備のリスク評価と RBM の基礎と応用」, 化学工学会関東支部, 2008
18) 高橋潤他：石川島播磨技報, Vol. 42, No.6,p319-323, 2002
19) 桜井茂雄：日本機械学会誌, Vol. 106, No. 1020, p31-32, 2003
20) 石丸裕他：ボイラー研究, 第 320 号 p22-27, 2003
21) 日本学術振興会/リスクベース設備管理第 180 委員会, 2002
22) 物質・材料研究機構：4th International Workshop on Risk-based Engineering, 2008
23) 財団法人機械システム振興協会/財団法人産業創造研究所：高度設備管理技術支援の基盤構築に関する調査研究報告書, 2002.3
24) http://www.e-leafsystem.com
25) 財団法人機械システム振興協会/財団法人産業創造研究所：高度設備管理技術支援の基盤構築に関する調査研究報告書, 2003.3
26) 大島榮次：検査技術, Vol.10, No.11, P.18-25 , 2005
27) 木村亨, 他：最新保全技術研究会第Ⅲ期報告書, p117, 社団法人日本プラントメンテナンス協会, 2008.3
28) 緒形次郎：配管技術, Vol.48, No.8, P.61-64 , 2006
29) 大島榮次：私信
30) 大島榮次：ペトロテック, vol.25, no.9, p.702-707, 2002

第2章　最近の設備事故

2．1　最近の設備事故の概要

高圧ガス、都市ガスおよび LP ガスの各分野で、事故件数が急増しており、経済産業省は平成 20 年 7 月より、産業保安関係事故の低減に向けた取り組みを開始した。経済産業省原子力安全・保安院の資料によれば産業保安分野（高圧ガス）における平成 19 年の事故報告件数は平成 12 年の 6 倍となっている [1]（表 2.1.1、図 2.1.1）。

表 2.1.1 産業保安分野（高圧ガス）における事故の報告件数 [1]

年(平成)	12	13	14	15	16	17	18	19
事故総数(件)	121	190	281	384	491	504	553	724
対前年増減率	－	57%	48%	37%	28%	3%	10%	31%
対平成 12 年増減率	100%	157%	232%	317%	406%	417%	457%	598%

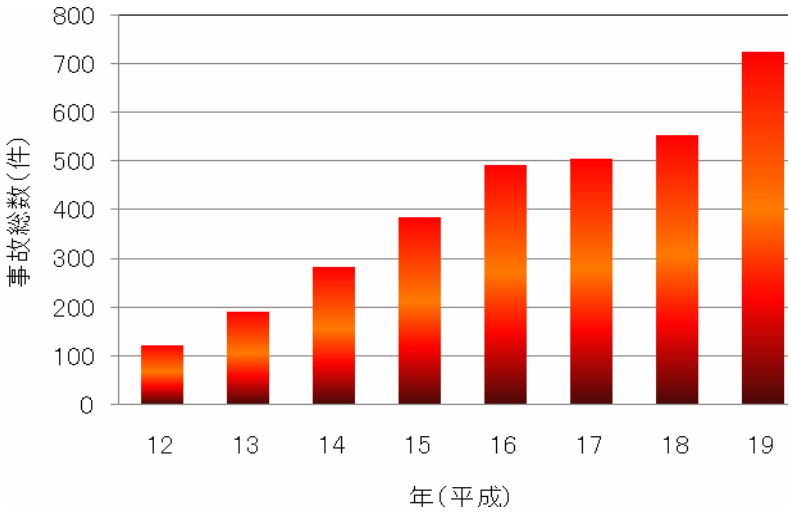

図 2.1.1 産業保安分野（高圧ガス）における事故の報告件数

また、総務省消防庁によれば平成 18 年中に石油コンビナート等特別防災区域の特定事業所で発生した災害の件数は 236 件であり、前年（144 件）と比較すると大幅に増加（92 件）しており、平成 19 年中についても前年とほぼ同様の高水準で推移している（図 2.1.2）[6]　。

全般的な発生件数の傾向は、平成 6 年以降増加に転じ、災害原因をみると、管理面や操作面などの人的要因が 124 件（51.0%）と多いが、設備の劣化や故障などの物的要因についても 101 件（41.6%）となっている。

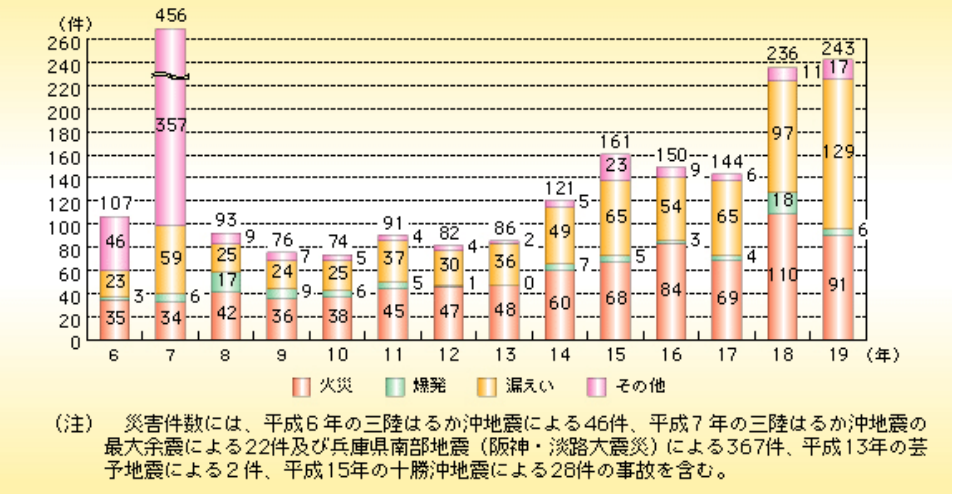

図 2.1.2 石油コンビナート事故発生件数

平成 15 年に製造現場等における重大災害が頻発したのを受けて、経済産業省は「産業事故対応会議」を設置し、「産業事故調査結果の中間とりまとめ」を策定、公表した。さらに、産業界からもメンバーとして参加した「産業事故連絡会」を設置し、各業界で行われた主要な取組についてのアンケート調査を実施した上で、平成 17 年 12 月には業界団体に調査結果の周知徹底を要請している [7]。

この中で、設備・部品のリスク管理における未実施の主要な取り組みに対する阻害要因として、

①設備管理システムを見直したいが、能力不足で進まない。

②点検・診断技術や人的・資金的な経営資源にも限界がある

③設備・部品の適正更新を進める上で、部品、設備毎に更新時期を決定する判断材料が少ない、寿命データベースがあれば、もっと確実に適正判断して更新を促せる。

④簡易な寿命判断ツール又は測定法がないため、経験と勘に頼らざるを得ない。

⑤現在の寿命予測技術をさらに高度化するためには、背景となる技術データの蓄積が必要。

などが挙げられており、設備管理技術面における課題克服には新たな手法や仕組みの構築が必要であることを示唆している。

平成 20 年には高圧ガス、都市ガスおよび LP ガス分野の事故報告件数の急増を受けて、経済産業省は「産業保安関係事故の低減に向けた取り組みについて」[1]の中で

①保安のための投資が適切に行われているか。

②多重な外注構造が安全面でマイナスに働いているのではないか。

③技術や経験の水準は適正に確保されているか、保安意識が低下しているのではないか。

との問題意識から、分析を深めるとともに、より実効的な対応策を検討していくこととしたい、としている。

2．2 設備事故の特徴と原因

「産業事故調査結果の中間取りまとめ」(H15 経済産業省)[3)]では「産業事故の原因として約 2 割の企業が技能伝承及び教育に問題があると指摘している。今後、2007 年には団塊世代の熟練技能者からの世代交代が確実な状況にあることを考えると、製造現場において広く、保安技能の伝承と中堅・若手への保安教育を着実に実施していくことが必要である。」としている。さらに、同報告の中で

> 経営における「安全・保安」の位置づけ
>
> 産業事故の背景として考えられる、保安技能の伝承や保安教育、協力会社等を含めた保安体制、また設備の適切な更新投資等は、まさに人的資源・設備的資源の配分という「経営判断」そのものと言える。「安全・保安」は企業が成長する上で重要な価値の一つであり、近年の頻発する産業事故を踏まえると、経営の品質という側面においても、今後ますます重要な位置づけとなる。各企業の経営トップは、「産業事故」が発生した際の従業員等の生命、企業活動していく上での信頼・信用・安心感の喪失、ひいては近隣の日常生活や地域経済への影響を熟慮し、「産業事故」は経営資源の配分ミスによる「経営の失敗」とも言える事態であることを厳しく認識することが必要である。そして、各企業が持続的に成長していくためにも、産業事故を発生させないという使命感や緊張感を経営トップから製造現場の隅々にまで持続させるとともに、必要なコストは企業活動において適切に負担するという「健全」な経営判断を通じて、経営トップの責任のもと産業事故の防止に最大限努めていくことが何よりも重要である。

としており、設備管理が単なるコストメリットの議論を超えて、企業の社会的責任として取り組むべき課題としている。このように、保全を取り巻く環境は単に生産阻害に伴う経済的損失という内向きの要因だけでなく企業の社会的責任という外向きの要因への対応を迫られるものとなってきている。

設備事故の実態について高圧ガス保安協会が取りまとめた事故事例データベースからその特徴を探ってみた。事故事例データベースには製造事業所、移動、消費に関する事故事例が収録されているが設備事故に関する事故事例が対象であることから製造事業所に関する事例について分析した。事故原因は劣化、誤操作、点検不良、認知確認ミスが上位を占めている（図 2.2.1）。原因のトップは劣化であり、劣化以外の原因は運転操作あるいは設計製作に起因するものである。劣化という設備管理に関わる事象が事故の主要な原因になっている点は見過ごすことのできない課題であると言える。

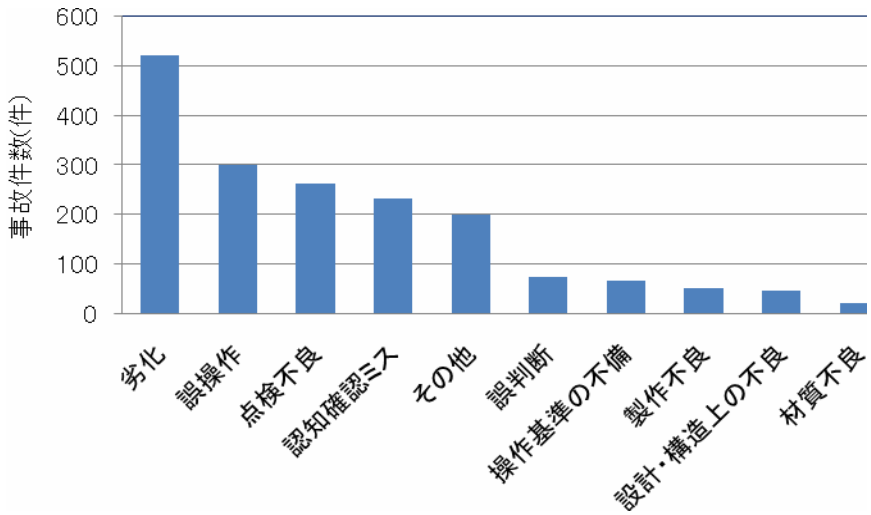

図 2.2.1 事故原因別発生件数

事故事例データベースにおける劣化による事故を時系列的に見ると、2003 年以降、急増している（図 2.2.2）。また、劣化の要因としては腐食が最も多く、亀裂・摩耗・疲労と続いている（図 2.2.3）。

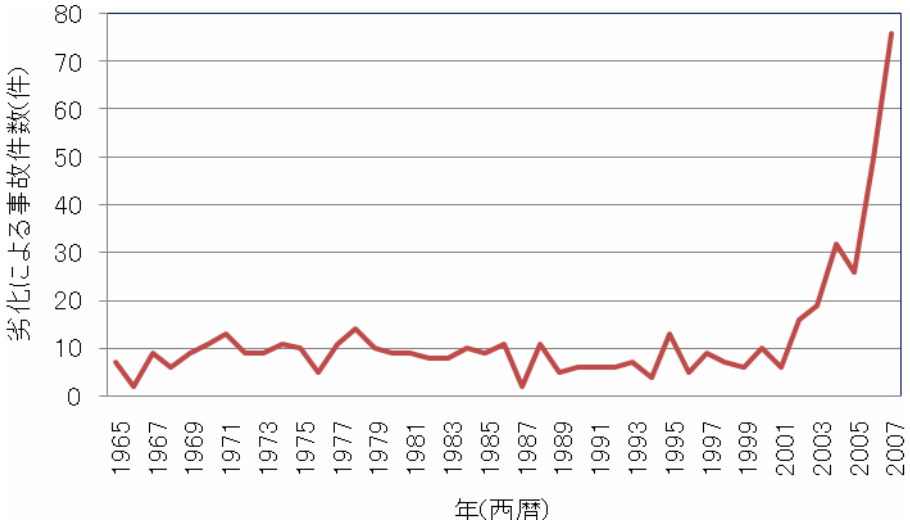

図 2.2.2 劣化による事故件数の推移

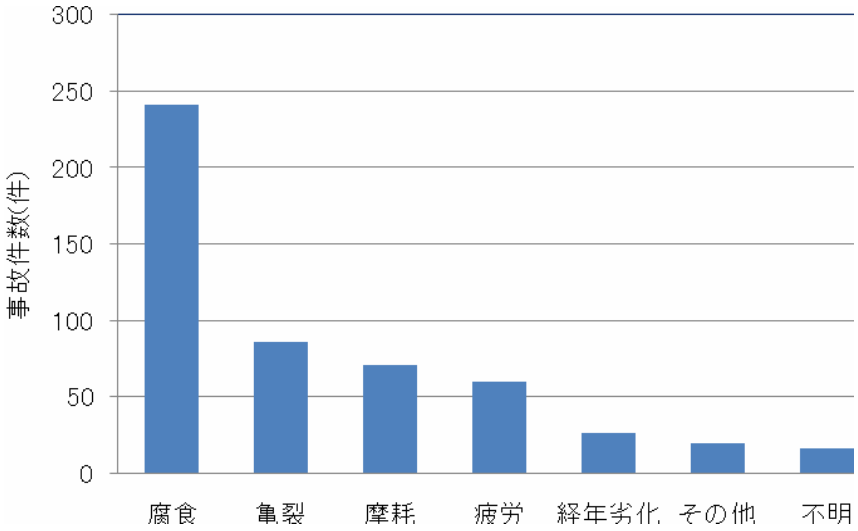

図 2.2.3 劣化要因別事故件数

事故事例データベースには高圧ガスの他に「国内参考」の事故事例が収録されている。高圧ガスと同様に製造事業所に於ける事故事例についてその原因を分析した。国内参考の事故事例でも劣化が主要な原因であり（図 2.2.4）、 劣化の要因も腐食が最も多い（図 2.2.5）。

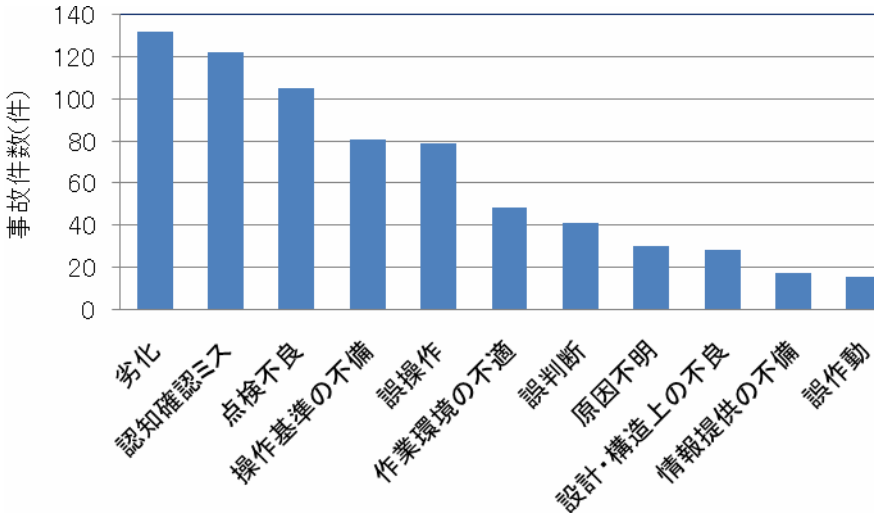

図 2.2.4「国内参考」の原因別事故件数

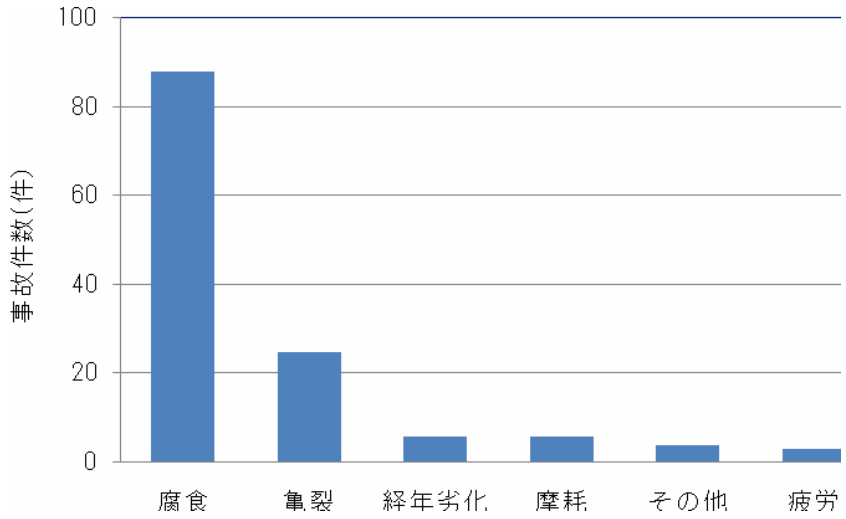

図 2.2.5「国内参考」の劣化要因別事故件数

高圧ガスの事故事例に見られるように設備の高度化が進む一方で、バブル崩壊に伴う低成長によって設備のリプレイスが見送られ、古い設備の継続使用に伴う劣化が主要な原因と想定される設備事故が増加している。

佐藤[5]によれば、高経年設備事故の主たる原因である腐食劣化への対応は従来から行われているような、「トラブルの発生を受けてから類似トラブルを含めて再発防止対策を行う方法」では、考えられる類似箇所は広範囲におよび、該当箇所数は相当に多くなるため事故を防ぎきれないとし、それを示す事故事例が次のように報告されている。

(1) 事故事例 1

1960 年代に設置されたプラントの配管で、1980 年代に改造した垂直配管の仕切弁出口直下の部位が 2003 年になって破孔、漏洩した。原因は満液系ではない操作条件であったため、弁の下流で配管への液の集中的衝突が継続的に発生、エロージョン・コロージョンで破孔に至ったものである。この配管系はプロセス液による軽度な腐食環境であることが認識(0.035 mm/y)されており、定期的に配管の肉厚検査をしていた。しかし、このような現象での減肉は予想しておらず、かつ、この部位の検査はしていなかったし、事故直前の 2003 年 7 月に行った検査でも、従来通りの減肉傾向としか分からなかった。この工場では、内部腐食に起因する漏洩事故を防止するため、配管肉厚測定は、腐食性流体を取り扱う配管と、高流速、二相流、スラリーなどによるエロージョンが懸念される部位に対して計画的に実施していた。エロージョン･コロージョンについては、全プラントにわたって類似箇所の調査と検査を実施したにもかかわらず、対象箇所の抽出の段階で操作条件も含めた視点での配慮が十分でなく、結果として事故を防げなかった。

(2) 事故事例 2

1970 年代に設置されたプラントの配管で、1990 年代に改造した配管のエルボ部が 2004 年になって破孔、漏洩した。この配管系はプロセス液による軽度な腐食があることが認識されており、その腐食生成物が改造部の配管には配管内面全面にスケールとして付着していた。事故原因はエルボを含む改造配管系では、間欠操作として内容物の液抜きブローを行っていたが、ブロー時の流体が集中的に当たることで、この部分のスケールが除去され、金属の新生面を露出させる。この金属新生面では再度腐食生成物が生成されることで減肉が生じる。この現象が繰り返され、減肉が進行し、貫通、漏洩に至ったものである。この配管系でも、プロセス液による軽度な腐食環境であることが認識されており、定期的に配管の肉厚検査をしていたが、このような現象での減肉を予想しておらず、次回の検査を 2007 年と設定していた。

その他の事例についても、「事故が定常運転中の定常運転条件と考えられていた状態で発生しており、事故発生の設備系統では何らかの劣化が予測され、検査も実施しているにもかかわらず間欠運転や流れの変動、温度の変動など他の加速的劣化要因を事前に劣化予測に組み込むことができずに結果として事故が発生している。こうした経年劣化が懸念されるプラント･設備への対応として重要なのはすべてを見逃さないという方法論であり、それに必要なのは網羅的な劣化の抽出が必要である。」と指摘している。

2．3　設備保全費用と設備保全技術者の変化

2006 年度の設備保全費は製品出荷額の 2.1%（6.2 兆円）であり、率・金額ともに漸減傾向となっている。反面、維持補修投資は製品出荷額の 1.1%（3.2 兆円）で、率・金額ともに漸増傾向となっている（図 2.3.1）。 製品出荷額が増加していることから、保全費を抑制しながらも、維持補修投資を行うことで生産量の増大を図っていることが伺える（図 2.3.2）。

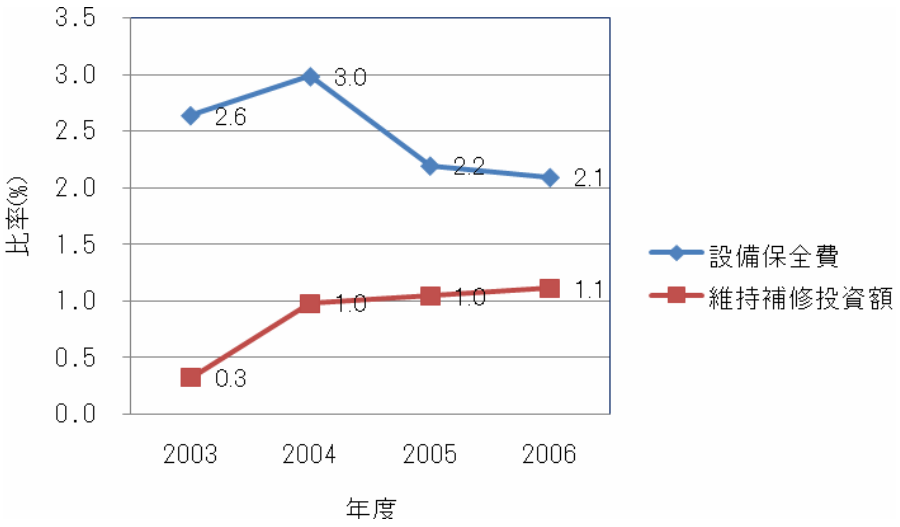

図 2.3.1 製品出荷額に対する設備保全費比率･維持補修費比率の推移 [4)]

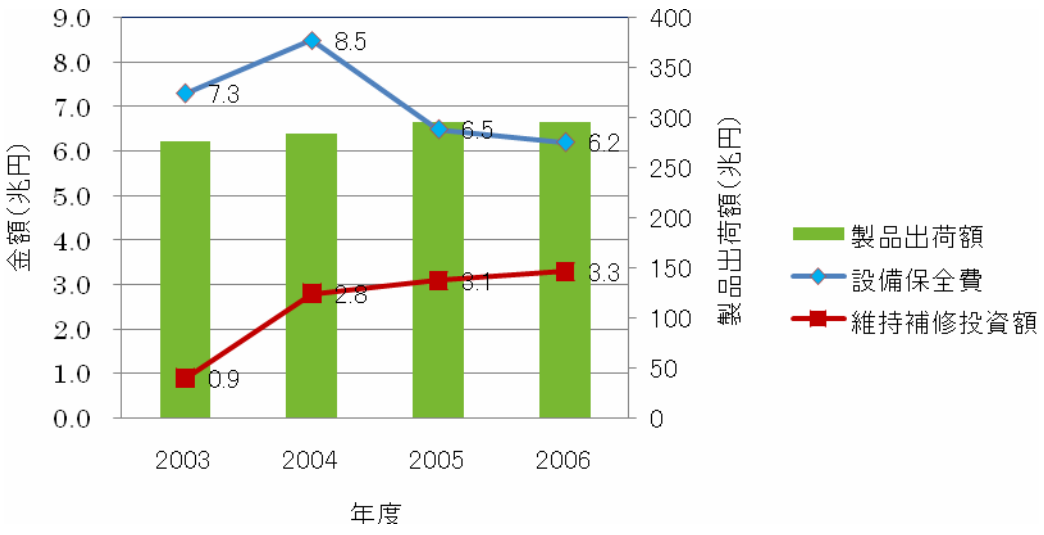

図 2.3.2 設備保全費･維持補修費の推移 [4)]

保全部門の人員は過去一定の水準を保って来たが 2006 年度は対前年比▲40%と大幅に削減されている。2006 年の推計従業員数は 2005 年に較べるとほぼ横ばいであることから、保全部門人員の絶対数も大幅な減少が見られる（図 2.3.3）。

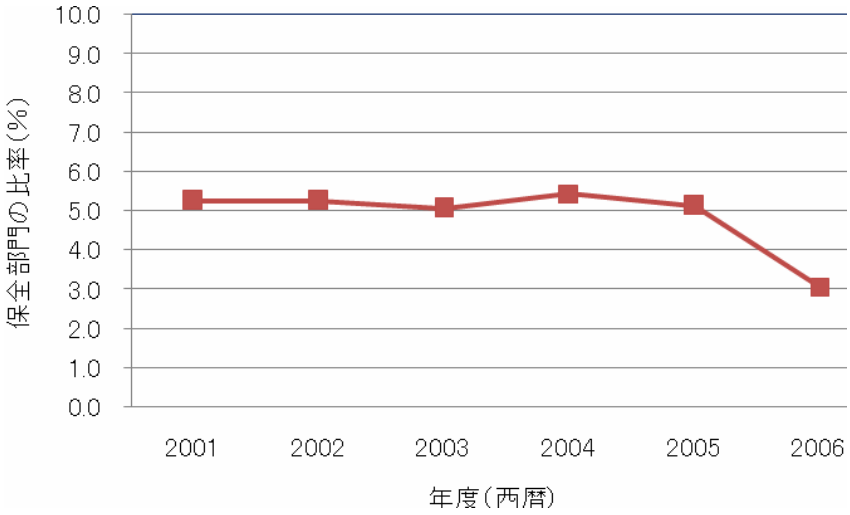

図 2.3.3 保全部門構成比率の推移 [4)]

保全費用の圧縮・高経年設備の増加・保全部門人員の削減などと保全を取り巻く環境が厳しくなるに伴い、「人材育成」、「故障の再発・未然防止」、「高経年設備対応」などが課題認識としてクローズアップされている。また、「保全マネジメント」、「保全データの活用・分析」などベテラン層の減少や蓄積された保全データを有効に活用できる人材が不足している状況が伺える（図 2.3.4）。

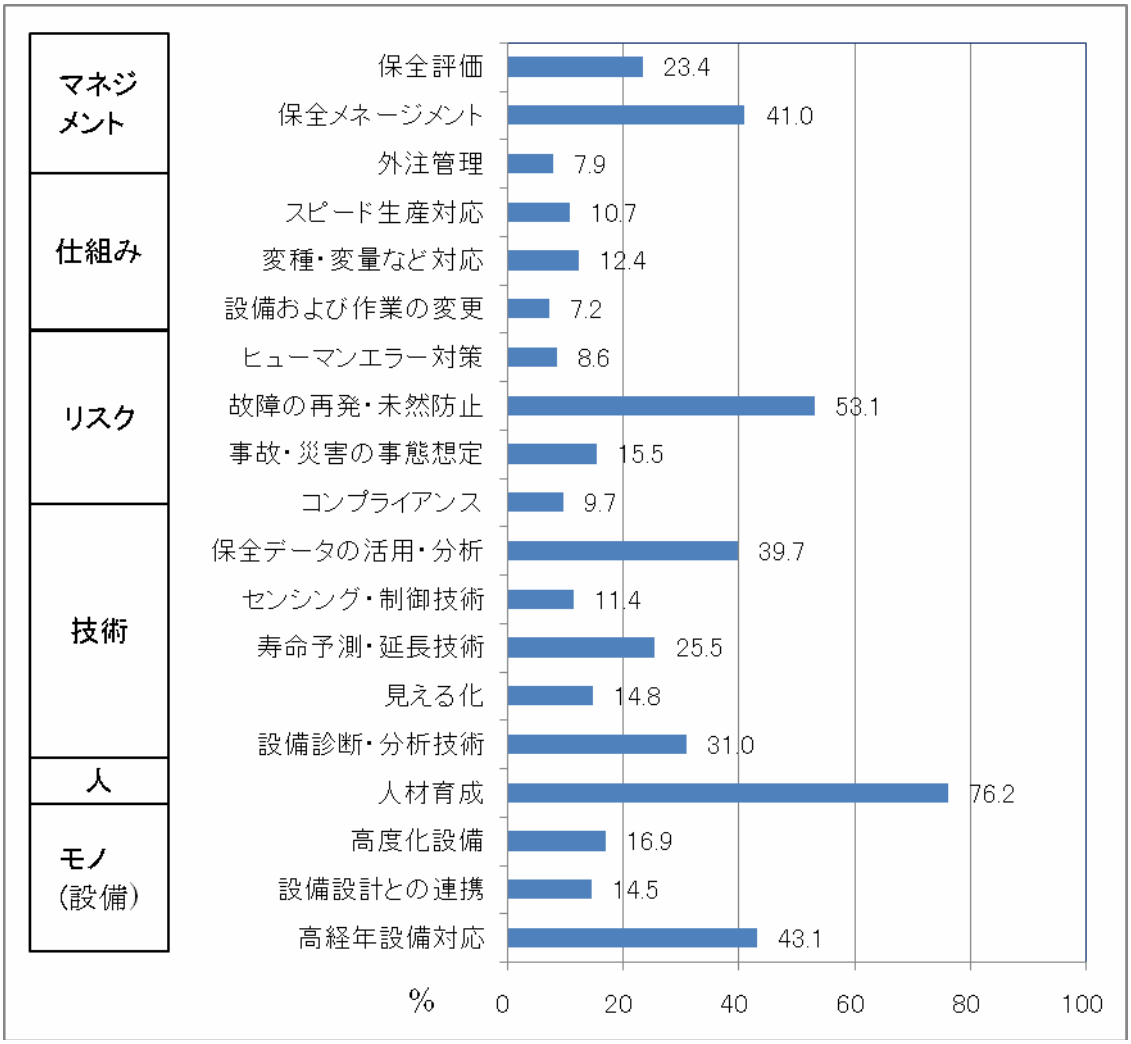

図 2.3.4 課題の認識状況 [4)]

2．4 まとめ

設備事故は単に経済的な損失のみならず企業の社会的責任をも問われるほど重要な課題になってきている。近年増加している設備事故の主要な原因は劣化である。背景には高経年設備の増加、団塊ベテラン層の減少、中堅・若手への技能伝承の遅れ、保全費用の圧縮など複合的な要因が挙げられる。設備事故防止に重要な役割を担う設備管理技術の領域においては、網羅性が求められており、発展の目覚ましい IT を積極的に取り入れた設備管理技術体系のさらなる進化が期待される。

参考文献（第 2 章）

1) 経済産業省 原子力安全・保安院：「産業保安関係事故の低減に向けた取り組みについて」, 2008
2) 高圧ガス保安協会：「事故事例データベース」
3) 経済産業省：「産業事故調査結果の中間取りまとめ」, 2003
4) 社団法人日本プラントメンテナンス協会：「2007 年度メンテナンス実態調査報告書」
5) 佐藤信義：化学装置, vol.47, no.12, p.20-25, 2005
6) 総務省消防庁：平成 20 年版消防白書
7) 経済産業省：第 3 回産業事故連絡会の開催について 【資料 2】産業事故防止に向けた取組の進捗状況について（回答）, 2005

第3章 設備管理技術を取り巻く動向

3．1 設備安全に関する政策・規準の動向

3.1.1 欧米の法規格

(1) 米国規格の要求事項

国際市場での新設プラントエンジニアリングには、プラント・オーナの経営目標の適合の他に、安全と環境に関わる制定法の遵守や ISO、IEC、API などのグローバルスタンダードへの準拠が求められている。

米国の連邦法として OSHA/PSM がある。OSHA (Occupational Safety and Health Act)は、プロセス安全マネジメント(PSM: Process Safety Management)を法制化した。これは、1980 年代に多発した化学プラントの爆発事故を契機に、1992 年プロセスプラントの危機管理を目的とする API/RP750 の規定を基本に、MIL-STD/882B の規定するシステム安全プログラムの安全思想を取り入れたものである [1)]。

PSM の特徴は、プラントの全ライフサイクルにおいて、設計時におけるプロセス危険分析(PHA)を基本とする設計仕様を、調達・施工・コミッショニング・運転・保全および廃棄に至る全てのステップに反映させることにある。基本要求事項およびハザード分析とリスク評価を表 3.1.1、表 3.1.2 に示す。

表 3.1.1 OSHA/PSM 基本要求事項 [2)]

プロセス安全情報	準拠規格、物質収支、物性情報、等
プロセス危険分析	PHA： Process Hazard Analysis
Q&M マニュアル	緊急操作、PPE、Permit Work、等
トレーニング	プロセス操作に関する教育訓練
言式運転前安全審査	PHA の実施、仕様の妥当性審査
機器の健全性	ASTM、UL、等への準拠、試験検査
工事請負業者	下請業者の選定、安全管理、責任
作業許可	閉鎖空間作業、火気使用、etc.
変更管理	物質、手順、技術、機器の変更
緊急時対応プラン	Emergency プラニング
法令遵守監査	OSHA/PSM の遵守

表 3.1.2 PSM におけるハザード分析･リスク評価 [2)]

	関連法･規格	分析評価作業内容
コンフィギュレーションマネジメント(変更管理)	MIL-STD-483 Configuration Management Practices	設計の変更が､システムの性能信頼性､安全性に及ぼす影響を分析評価し､変更に伴う安全性の確保に関する検証と妥当性の評価確認の実施
閉鎖空間作業許可プログラム	OSHA/Confined Space Standard	閉鎖空間内に存在するハザードの特定とリスクの分析評価結果に基づく､立入許可に関する手段･手順･監視･緊急時の救急など
PPE プログラム	OSHA/PPE	作業に伴うハザードの特定とリスクの分析評価結果に基づく､人体保護具(PPE)の選定･使用制限･保全管理･汚染除去･廃棄など

(2) プラントの設計におけるハザード分析とリスク評価

PSM が要求しているリスク・ベース型の安全確保のためのマネジメントとエンジニアリングは、設計時における PHA の結果に基づき、各ステップのハザード分析とリスク評価を求めている。また､プラント･オーナは､PSM の規定要求を補完するため API RP 580「Risk based Inspection」及び IEC 61508「電気/電子/プログラマブル電子式の安全関連システムの機能安全性」に準拠した保全計画の策定を設計・建設者に求める。PSM を軸とした API RP580 と IEC 61508 との関わり、及びプロセス機器と制御系の健全性を求める PSM 監査との関わりを図 3.1.1 に示す。

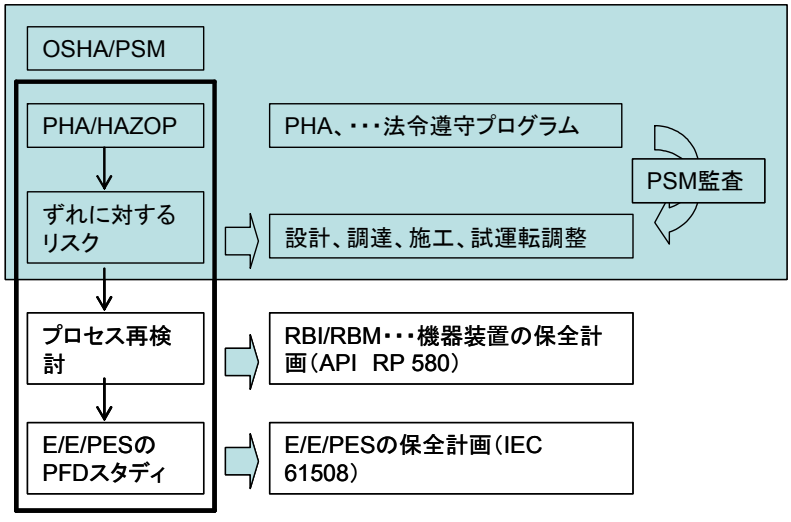

図 3.1.1 OSHA/PSM と API/RP580、IEC/61508 との関わり [2)]

(3) 耐用年数に対応した保全計画

ISO 12100 および IEC 61508 の規定は全ライフサイクルを対象としている。このためリ

スクアセスメントを実施する前提条件とした耐用年数を含むプラントの仕様について特定しなくてはならない。ISO 12100 では、機器の意図する使用およびコンポーネントを考慮に入れた予見可能な寿命(life limits)に関する仕様を要求している。プラント・オーナもまた耐用年数を指定するので、納入したプラントが契約上で指定された耐用年数だけ運用できなければ保証違反となり、製造者責任問題に発展するおそれもある。

指定された耐用期間内においてプロセス機器と制御系の健全性を維持するためには、米国の UPLA (統一製造物責任法)110 条で定める「有効安全寿命」および「法定責任期間」の条項を考慮したリスク・ベースによる適確な保全計画を策定し、プラント･オーナに提示し、その履行を求めることが必要不可欠となっている。

(4) ASME/ API の圧力機器規格の動向 [3)]

圧力容器の国際的規格作成団体である ASME International は､圧力機器規格(Post Construction Codes)の作成を進めてきた。圧力機器の規格は新しい設備の設計、製作に関するものが主体であったが、これらの機器は長期に使用された結果、経年劣化やきずが発生している。運転継続のためには、その機器の健全性を評価して、運転継続に対する判断・処置決定をする必要がある。すなわち、設計段階に適用される運転条件の予測に基づく設計裕度(Design Margin)による技術基準に代わって、供用期間や運転条件が明確な供用適性を考慮した運転裕度(Inservice Margin)による技術基準に基づいて、より的確な評価を行なう必要がある。これらの技術については、これまで米国石油メジャーなどが社内基準として、個別の設備に実用的な判断手順判定方法を適用してきたが、その重要性、メリットから､一般にも共通して使える技術としての基準化を進めるために､API CRE (Committee on Refinery Equipment)は、維持基準として必要な検査・評価・補修に関する規格化を進めてきた。

表 3.1.3 ASME の維持規格の検討

1993	Ad Hoc Task Group on Post Construction
1995	Post Construction Committee(PCC) 、Subcommittee on Inspection Planning と Sub committee on Flaw Evaluation
1998	Guidelines for Pressure Boundary Bolted flange Joint Assembly
1999	Subcommittee on Repair and Testing
2006	Repair of Pressure Equipment and piping
2007	Inspection Planning Using Risk-Based Methods

最近の検討規格には、以下がある。

・API/ASME Fitness For Service Standard

API RP579 を元にその Version2 とも云うべき API 579/ASME-1 FFS Standards を作成

・Joint API/ ASME Pressure Vessel and Piping Inspection Code
API 510(Pressure Vessel Inspection Code)と API 570(Piping Inspection Code)の合体を ASME BPTCS と API CRE にて協議
PCC において以下の規格が作成された。
PCC-2-2006 Repair of Pressure Equipment and piping
PCC-3-2007 Inspection Planning Using Risk-Based Methods

①Inspection planning

ASME PC、SC on Inspection Planning では、設備の所有者、操業者および設計者に対して、圧力機器の検査プログラムの作成、実施についての指針を与えるものとして、ASME Sec.XI Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components (原子力発電用機器の供用中検査の規定)の適用を受けない定置式一般圧力機器に対して、PCC-3-2007 Inspection Planning Using Risk Based Methods(リスクに基づく方法を用いた検査計画)規格が作成された。

この中で、採用すべき検査方法、検査の施行範囲(検査すべき全面積の割合または箇所)、検査周期(時期)、その他のリスク緩和活動、検査後のリスクの残留レベルと他の実施された緩和活動が含まれる。この標準の目的は、RBI (Risk Based Inspection)の実施に使用される概念と用件を提供することにある。

②FFS(Fitness For Service)

FFS 評価は、きずや損傷を評価する解析的手法からなっており、その機器が継続して供用されるかどうかを決定するためのエンジニアリング評価手法である。FFS 評価によって得られるものは、その機器がそのまま、部分的改造、補修、監視または交換によって運転を継続するかどうかの判断であり、検査間隔に関する指針も与えられる。

この定義に基づき、API CRE FFS Task Group は、MPCJIP が初版の API 579 作成のために行った試案を改良し、FFS(供用適性)評価技術基準として API RP579 を 2000 年に発行し、API RP579 Fitness For Service 及び API RP580 Risk based Inspection の構成となった。

きず評価規格について ASME は、API RP579 を全面的に取り入れることで、API/ASME FFS Joint Committee を立ち上げ、その第 2 版ともいえる改訂版を作成した。石油精製・化学機器に適用する目的の API 規格から、一般産業圧力機器の適用に向けての API/ASME 規格へと展開しつつある。

③Repair and Testing

圧力容器の補修および試験・検査法について、2007 年に、ASME PCC-2-2006 Repair of Pressure Equipment and Piping が発行された。

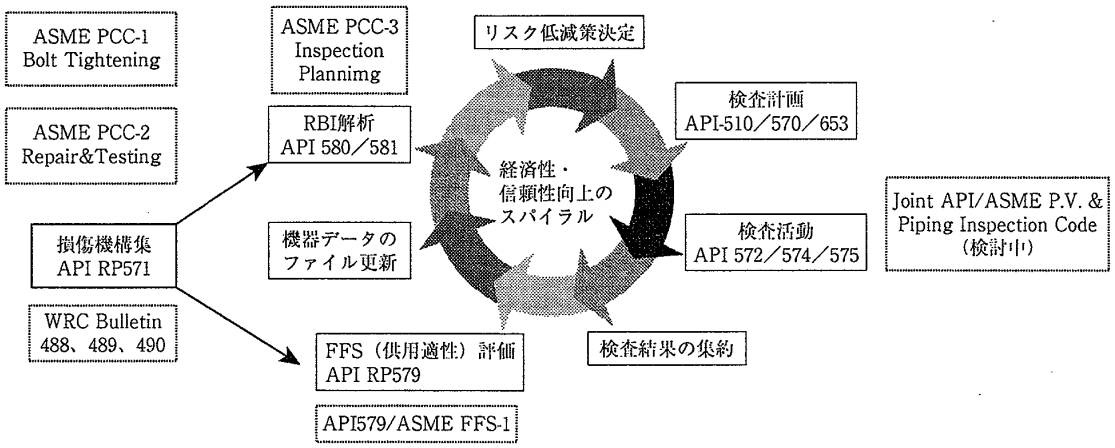

図 3.1.2 API の FFS、RBI による圧力容器の経済性・信頼性向上活動 [3)]

このように、米国では API および ASME とも維持規格の体系が整備されてきたといえる。

3.1.2 わが国における圧力設備の維持規格の動向

(1) 圧力設備の維持規格 [4)]

2002 年ころより供用適正評価規格の導入の検討が開始され、2005 年に石油連盟、石油化学工業会の参加企業と高圧ガス保安協会の三者による「余寿命予測規格勉強会」がスタートした。ここでは、供用適正評価を取り入れた余寿命予測規格の作成の検討が行われている。本規格案は、設備毎に運転条件や環境から予測される劣化・損傷を網羅的に抽出することによって、それに応じた検査を行い、そのデータを用いて供用適正評価と余寿命の算定を行い、余寿命予測に基づいた次回の検査時期を設定する。尚、次回の検査時期は、算定された余寿命に対しての信頼性を考慮した安全係数を加味して決定される。

評価の対象となる損傷は、腐食減肉に代表される時間依存型で、寿命算定の妥当性を立証することが可能な損傷、即ち、腐食減肉、クリープ損傷、水素侵食、疲労損傷としている。

(2) 石油学会、日本高圧力技術協会の維持規格など

石油精製設備の保守管理の指針について、社団法人石油学会から設備維持規格が制定されている。図 3.2.3 に全体の構成を示す。基盤規格は「配管維持規格」と静機器を扱う「設備維持規格」がある。共通技術基準は「防食管理」「劣化損傷評価と対応」「検査技術」などの基準が制定されている。ここでは、検査計画策定や検査手法についてまとめられ、石油精製設備で問題となる腐食・劣化損傷に対する検査・評価法・対策などが解説されている。また、「機種別編」では、塔槽、熱交換器、ボイラ、球形タンクなどについて部位毎の検査ポイント、検査方法、留意事項などが整理されている。

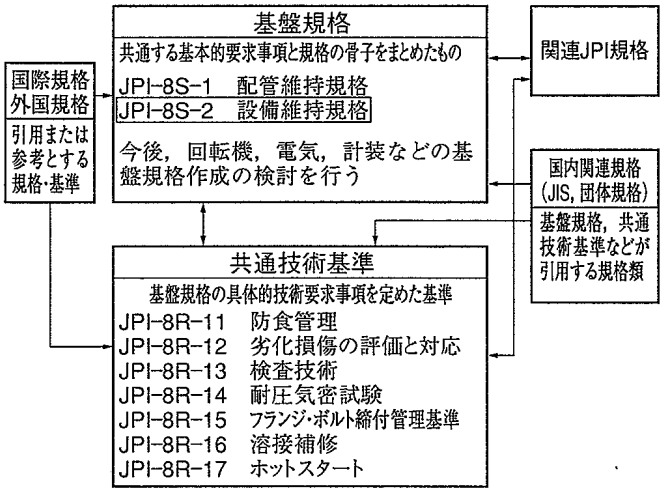

図 3.1.3 石油学会における設備維持規格の体系 [5)]

2001 年に日本高圧力技術協会に RBM 専門研究委員会が設立され、非原子力分野の圧力設備について、基準作成を目標とした活動を行ってきた。RBI のガイドライン、実際に RBI を適用する際の手順書としてのハンドブックの作成を目標とした。2008 年度に発行される予定とされている。

(3) 原子力発電機器／日本機械学会の維持規格 [6)]

構造機器の安全性・健全性を確保するためには、設計規格と維持規格の両者を策定・整備する必要がある。原子力機器の設計基準としては、ASME Sec.Ⅲが 1963 年に制定され、わが国でもこれに対応した国の基準として通産省告示 501 号が制定されている。一方、原子力機器の維持基準については、ASME Sec.XI が 1971 年に策定されたが、わが国ではこれに対応する国の維持基準はしばらくの間整備されず、設計基準を運転開始後の原子力機器にも適用してきた。これは、電気事業法などの国の法律によって、原子力機器は運転開始後も常に設置時の状態を維持することが要求されているためである。

これに対して、維持規格においては、破壊力学等による合理的、科学的手法を用いて安全性に及ぼす欠陥の影響を的確に評価した上で、プラントの継続運転あるいは機器の補修・取替えのいずれかを判断する手法が提示される。こうした維持規格の基本的な考え方は、航空機、船舶、石油関連施設などの各種産業分野において既に適用されていた。

原子力についても、各国はそれぞれ独自の維持規格を定めている。最も早く維持規格を開発したのは米国であり、1971 年の ASME Sec.XI の制定後 3 年毎に改訂版を発行してきた。わが国でも欠陥評価に不可欠な破壊力学に関する学術的な知見が国内の原子力研究などによって蓄積され、維持規格の策定に向けた条件が整えられてきたことを背景に、1980 年代になると財団法人発電設備技術検査協会において国内原子力維持規格の原案策定作業が開始された。1990 年代になると、規制緩和の流れが強まり、「公開」「公平」「公正」の原

則に基づく民間規格策定のための機関を国内において組織しようとする機運が高まり、1997 年に社団法人日本機械学会に「発電用設備規格委員会」が組織され、同委員会下部の「原子力専門委員会」における分科会のひとつとして「維持規格分科会」が 1999 年に組織された。2000 年に国内初の民間維持規格「発電用原子力設備維持規格 JSME S NA 1-2000」が発行された。2002 年には改訂版「JSME S NA 1-2002」が発行された。

維持規格は、一般に「検査」、「評価」、「補修・取替え」の三本柱からなる。供用期間中における欠陥の有無を「検査」によって調べ、欠陥が検出された場合には、破壊力学等の手法に基づいた「評価」により欠陥を有する機器の連続運転の可否を判断し、その結果、継続運転不可の場合には機器の補修・取替えを行う。JSME S NA 1-2000 では、クラス 1 機器の容器、管を対象とした欠陥評価が規定され、JSME S NA 1-2002 では、「検査」規定が追加された。

表 3.1.4 わが国における原子力機器の維持基準導入までの経緯

1914	ASME Sec. Ⅰ
1963	ASME Sec.Ⅲ
1971	ASME Sec.XI
1980	通産省告示 501 号
1997	日本機械学会発電用設備規格委員会設置
2000	日本機械学会維持規格 2000(評価)JSME S NA 1−2000
2002	日本機械学会維持規格 2002(検査)JSME S NA 1−2002
2003	健全性評価制度の導入

3.1.3 自主保全の動き

設備は時間の経過と稼動の結果、様々な部品・部位が劣化するために、保守を行う必要があるが、多くは操業を停止して定期的修理(SDM：Shutdown Maintenance)を行う。政府は安全を確保する方法あるいは条件は唯一ではないとの技術論の考えに立って、一般の安全に関する法規制も緩和の対象とし、1997 年に高圧ガス保安法に対して画期的な改正を行った。この結果、高圧ガス製造設備を有する多くの化学プラントや石油精製プラントは、法規制の緩和により長期連続運転が可能となった。運転条件の変更が少ない石油精製プラントにおいては、長期連続運転はメリットが大きい。この高圧ガス製造設備に対する保安規制緩和の政策に認定事業所制度があるが、長期連続運転の認定の他に、自主運転中保安検査体制と自主完成検査体制の認定が含まれており、大幅に自主的な管理に任せるという主旨である。

規制緩和は自主保安責任と一対のものとして認識されている。法規制は安全確保のために満足すべき条件を示し、それを運用の面で個別の条件に合わせて実現することが自主保安責任と定義される。このような規制は「機能性規定」と呼ばれている。安全に関する規

制緩和、すなわち自主保安責任への移行は、事業所にとっては、従来法律で定められた基準を守るという責任から、これに加えてもっと適正な基準を設定するという責任が加わることとなる。

規格・基準の整備には、「機能性規格」と「民間規格の活用」があり、これらは切り離すことができない。「民間規格」とは「voluntary consensus standards」つまり「自由意思による合意に基づく基準」であるが、民間規格を定めているのは ASME などが代表的であることから「学協会規格」と呼ぶのが適切との意見もある。技術基準は機能性規定と仕様規定に分かれる。例えば「振動により損傷を受けないような施設にしなければならない」との省令は、機能性規定であり、損傷を受けないようにするには流体の流速を遅くする、振動しにくい構造にするなどの対処法は複数あるが、その対処法は仕様規定に定める。

規格の策定活動は基本的には学協会に英知を結集せざるを得ない。そこに大学・研究機関等の学界、産業界、規制当局が集まるという形で進めることが考えられる。産業界は、必要な規定、人的・技術的支援、規格原案などの提示をして、それに代わって学協会規格の提供を受けることにより説明責任を果たすことができる。規制当局も同様で、国策として規格作成費用を提供し、学協会規格の提供により説明責任を果たすことができる。学界はリソースを提供するが、新たな研究ニーズが得られるかもしれない。

規制緩和と自主保安は、形式的や建前論に片寄りがちな安全規制から実効性を重視した安全規制への転換が促進されることとなり、このためには、国民の英知を結集して安全の根幹である科学的合理性を追求・活用することや、民間規格=学協会規格策定に産・官・学が協力する体制の強化に一層努めることが必要である。

3．2 経営戦略的な設備管理

3.2.1 現状と狙い

設備管理業務におけるシステム活用の基本的な狙いは、①設備機器仕様や設備管理履歴などの基本的なデータは正確であり、設備管理、運転、エンジニアリングの各部門でデータのやり取りが人手を介さずにできること、②PDCA がシステムを使うことでまわること、③現場を含めた設備情報を一元的（フィールドバス）に管理できることなどである。これらのシステム活用は、企業の種類によってバラツキがあるものの、設備産業では既に導入されているところが多い。組み立て産業である自動車産業においても製品は変わってもプレスなどの基本設備は変わらないので設備産業と同様となっている。しかし、電子産業では製品サイクルが短くスクラップ&ビルトを基本としているためにニーズは大きくない。

これらの設備管理業務システムを発展させ、経営とリンクした戦略的なシステムを構築し、プラントの全てのアセットを最大効率化することを目的としたシステム活用について議論されている。すなわち、ROA の視点を取り入れてステイクホルダーの利益を最大化するための設備保全が求められている。

このような経営戦略的なシステムは欧米で盛んに開発が進められてきた。この背景には、欧米の設備保全方式の特徴がある。欧米では、プラントの異常は自動検知して自動的に停止する方法が主流であり、必要なセンシングシステムを標準で採用するところが多い。このため、配置されている常設センサーからの情報とプラントの運転パラメータやエネルギーコスト、販売価格などの経理情報をシステムの中に取り込んで、プラントを最適効率条件で運営する方法が採用されてきた。

一方、わが国においては、対象とする設備の保全技術開発を中心に行われており、装置の材料・材質、物理・化学的な特性、その使用環境・目的による特定の経年劣化や劣化モードに対処する技術などの蓄積がある。これに加えて、運転／保全員の役割が大きく、結果として非常に高い設備稼働率と低い設備トラブル発生率が保持され、保全費の削減が進められた。しかしながら、設備産業においては高経年設備が増加しており、さらには、ベテラン保全員の大量退職時期が迫り、社会全体として重要な保全ノウハウが散逸してしまう危機をはらんでいる。

このような背景から、今後の経営戦略的な設備管理システムには、①設備保全の経営的な評価、②蓄積された保全技術の散逸防止、③高経年劣化設備の保全を行うことに狙いがある。

3.2.2 基本的なシステム構成

(1) 戦略－実施－評価のサイクル

CMMS/EAM(Computerized Maintenance Management System/ Enterprise Asset Management)等の保全業務の PDCA サイクルを実行するためのシステムや仕組みが存在

することを前提として、それらのシステムから保全データを取り込んで評価し、戦略化するというより大きな PDCA を行うことによって新たな戦略システムとすることが必要とされている。

企業資産管理システム EAM は設備管理コンピュータシステム CMMS が進化したものであるが、これに予知保全(CBM：Condition Based Maintenance)コンピュータシステムが進化したプラント資産管理システム PAM を連結させて設備管理システムが構成される。この設備管理システムが生産管理システムおよびライン制御システムとつながることによって、生産ラインの全体の管理システムとなる。設備管理システムと生産システムとの関係を概念的に図 3.2.1 に示す。

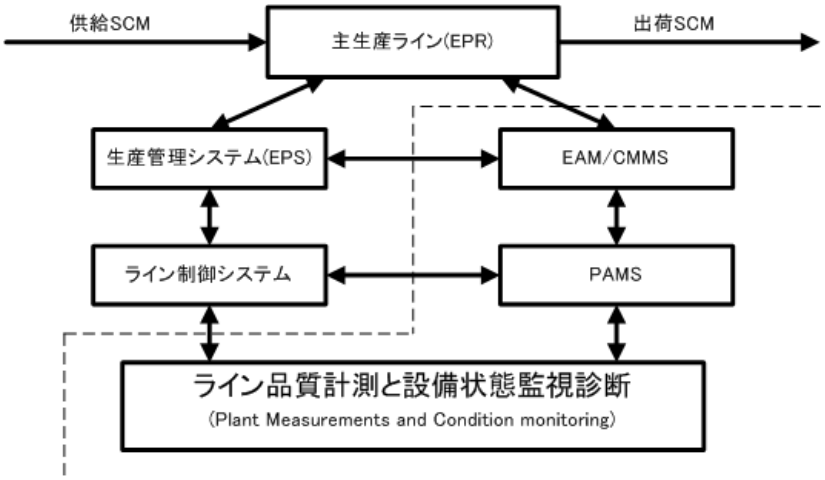

図 3.2.1 設備管理システムと生産との関係 [7)]

戦略的な PDCA を構築するための基本的なシステム例として、Meridium 社の「戦略化－実施－評価(S-E-E)サイクル」を示す。

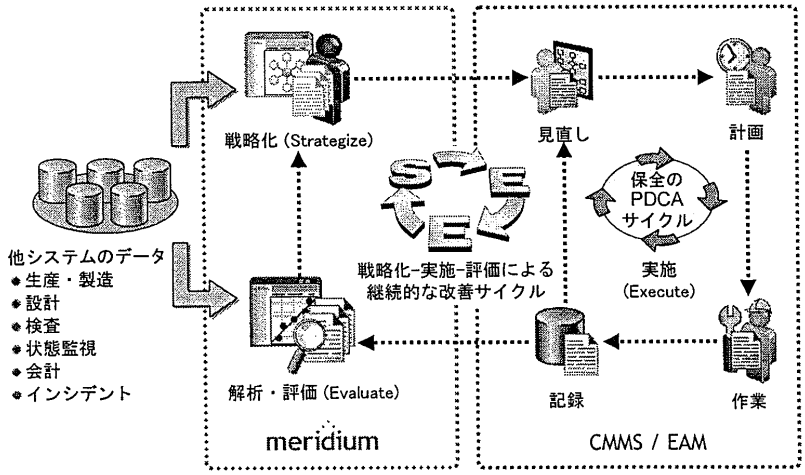

図 3.2.2 経営戦略的なシステム例 [8)]

保全作業を計画･実行し、履歴を記録して次回保全の計画を立てるという一連のワークフローを「実施」(Execute)という。これに他のシステムのデータを捉え、保全の実施内容を「評価」(Evaluate)するための機能と、何らかの意思決定がなされて「戦略化」(Strategize)し、保全計画を見直すための機能とを併せ持っている。

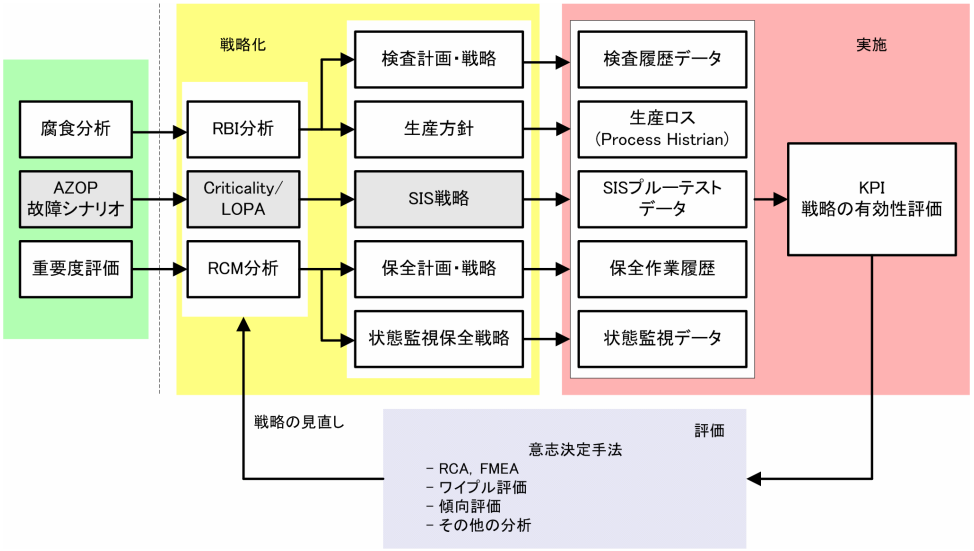

図 3.2.3　経営戦略的なシステムのワークフローの例 [8)]

この経営戦略的なシステムの目的には、①設備の生産性を高める業務を継続的に行うこと、②設備の生産性を予測可能にすること、③過去の履歴を事実として把握すること、④データを部門横断的に活用することなどがあげられている。事後的ではなく予測的な保全業務の実現であり、そのためのデータを揃え、理論的裏付けを作ることが必要となる。保全コストの削減という限られた視点ではなく、故障･事故というリスク管理を企業レベルで行い、設備の生産性を中心にした保全業務の最適化を図ることである。

(2) TPM/MOSMS

社団法人日本プラントメンテナンス協会が提案しているものに、MOSMS がある。これは、1960 年代から TPM を提案して日本の中で多くの実績をあげたが、その中に位置づけられるサブシステムといったものである。但し、コンピュータ・システムではなく、考え方を示したものである。保全には網羅性、重点性、経済性の技術的な 3 要素と、不確実性に対処するためのマネジメント要素を機能的に組み合わせることを提唱している。

保全の最終目的はステイクホルダーの利益の最大化であり、経営と保全が同じ土俵に立ち「保全グランドデザイン」を描くこと、「計画主導」で保全が実行されること、経営の PDCA サイクルと保全の PDCA サイクルを連動させること、個々の既存技術を資源として活用し、

「それら資源の多様性、変化・進歩を、構造を変えずに取り込む」ことを基本的なコンセプトとしている。

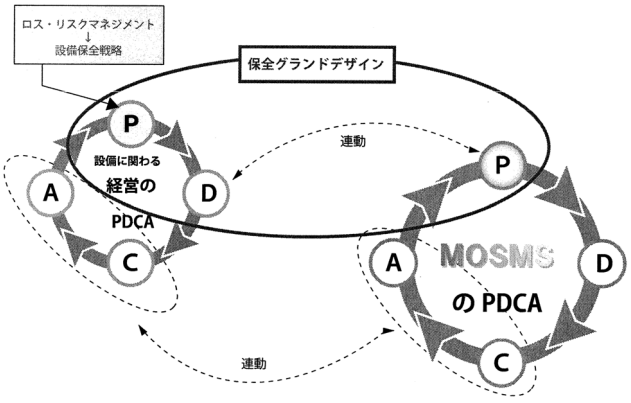

図 3.2.4 設備管理の経営への取り込み [9)]

保全の戦略－保全計画／保全データ管理－保全実行－保全教育・訓練の各フェーズに分けた実践的なシステムである。

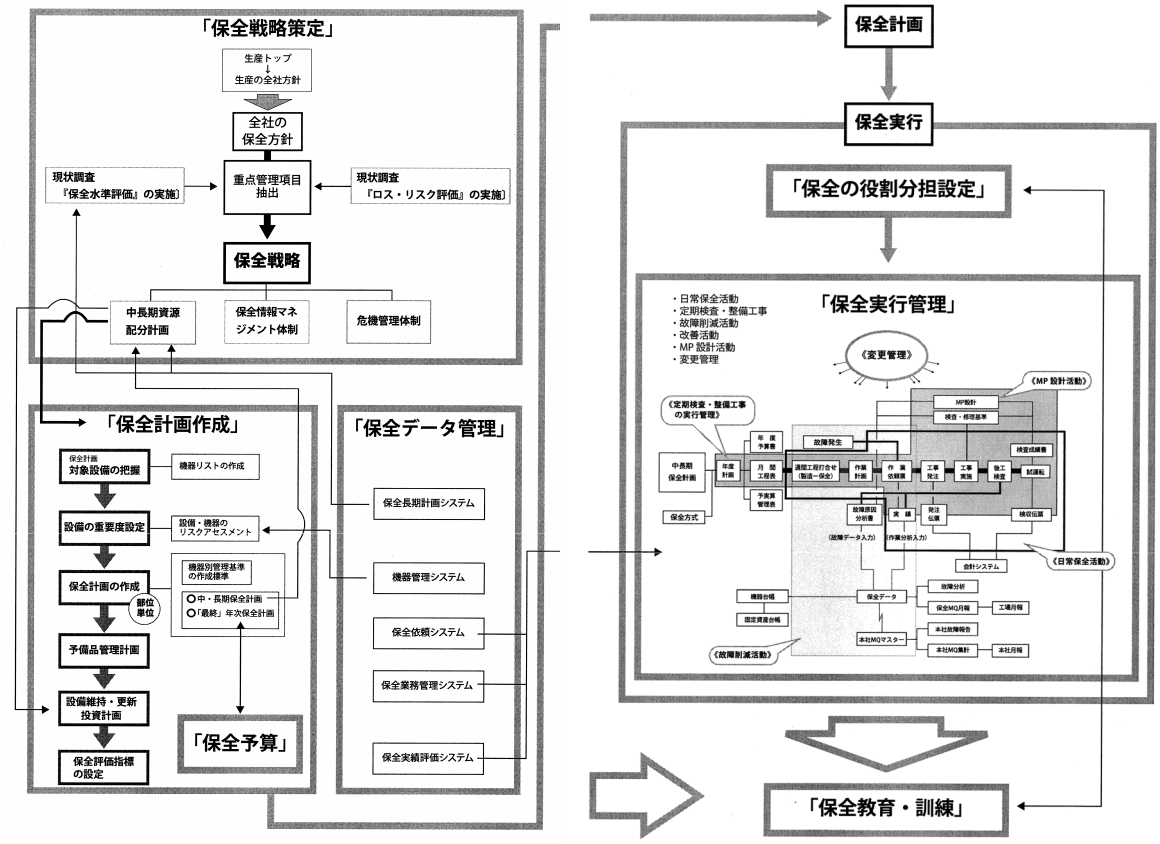

図 3.2.5 MOSMS における設備保全の実施フロー[9)]

3.2.3 サブシステムと基本手法の例

(1) 設備保全システム CMMS/企業資産管理システム EAM

わが国では、新日鐵などにおいて自社開発されたシステムが実用化されてきたが、最近では、欧米が先行して導入が行われている。欧米の生産工場では製品の製造やサービス提供に必要な全ての企業資産を有効に活用するために企業資源計画システム（ERP：Enterprise Resource Planning System）を採用している。これは、企業の資産の投資回収を最大化することを目的にしている。このシステムと設備保全システム（CMMS：Computerized Maintenance Management System）を統合した企業資産管理システム（EAM：Enterprise Asset Management）が生まれた。設備故障を回避するためには CMMS が ERP よりも優先されるために、これらのシステムを統合して企業資産の最適な運用という企業目的にあったシステムとした。製品と設備・プロセスとを一体として管理しようとする思考である。

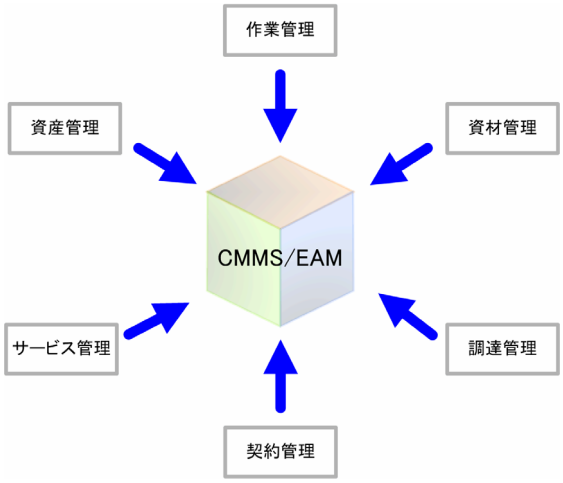

図 3.2.6　CMMS/EAM のシステム例

CMMS は、設備の保全管理を総合的にコンピュータで管理するためのシステムで、一般的には、作業管理、設備管理、資材在庫管理、資材購買管理、リソース管理などの機能から構成される。CMMS の例として、1968 年より MRO software 社が MAXIMO ブランドで資産管理／サービス管理ソリューション製品群を展開し、その後 EAM に発展させた。2006 年に IBM が買収したが、多くの企業で利用されている。アセットマネジメントシステムの構成を図 3.2.6 に示す。作業管理、資産管理、契約管理などの一連の業務メニューがある。この中に資産管理では、資産のライフサイクルに亘って管理することが志向されている。この中では、資産の詳細や履歴の追跡によって資産の存続期間を最大化し生産性を高めることや、資産コストの明確化、資産のモニタリングによるプロアクティブ保全などが考えられている。

(2) 状態基準保全 CBM/プラント資産管理 PAM

設備の状態を観測することによって故障の兆候を検知することができる [10,11,12]。設備診断によって設備の健全性を監視することに基づいた保全方式は状態基準保全(CBM：Condition Based Maintenance)と呼ばれている。CBM の特徴は、時間基準保全に比べて故障が予測される設備の取替えなど合理的な設備保全が可能となる。その精度は設備診断技術によるところが大きいが、設備の劣化に伴う属性の変化を検知することにあり、振動、厚さ、探傷、油分析、絶縁性、温度、AE、圧力などの診断機器がある。設備の劣化が緩慢なものは間欠的に、異常診断から故障までが短いものは常時観測する。設備の劣化の進行状況を把握できる点では進んだ方式であるが、多くの観測データの収集と管理は非効率的でもある。

PAM システムのコアとなっているのは、従来からあった状態監視システムであり、プラントのさまざまな設備管理用データを必要に応じて必要な分解能と周期で収集するものである。システムとしては、これ以外に運転制御システムと CMMS/EAM システムがリンクすることにより、プラント内のさまざまなデータが密にリンクされる [13]。

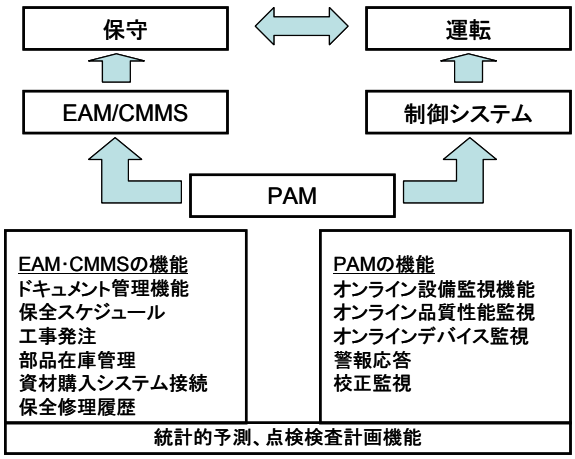

図 3.2.7 PAM と EAM/CMMS のリンク [21]

(3) 機器重要度の算出

設備の適切な維持管理には、保全の内容、周期を一律とすることは不合理であり、設備の重要性に応じた保全が必要となる。

①RBI/RBM のリスクベースの考え方

機器のリスクレベルに応じて保全、検査手法、頻度を変える考え方である。機器の重要度に応じた保全手法の選定については色々なロジックが提案され、実用化されている [23,24]。一般に提案されている重要度算出法は、運転条件、取扱い物質、使用材料等の各項目を定性的に分類し、重みをつけて点数化する方法がとられている。生産への影響も定性的に幾つかのクラス（例えば当該機器の故障が生産への影響大、中、小)に分けて評価する場合が

多い。

機器重要度決定法の一例[25]では、設備の安全運転(安全性の視点)と独立に安定操業（安定性の視点)を設け、安定操業の定量化には各機器の故障が生産量の低下に与える寄与として重要度(Importance Factor)を用いている。重要度には a) Birnbaum 重要度、b) Criticality 重要度、c) Fussell Vesely 重要度、d)Risk Reduction Worth その他色々な指標が提案されている。予防保全の指標としては、d)Risk Reduction Worth(当該機器の故障がゼロになったと仮定した場合の設備稼働率が向上する効果の大きさ)や b) Criticality 重要度(設備全休の非稼働率への当該機器の故障の寄与度の大きさ)をあげている。

また、原子力発電所の重要な不具合情報の抽出方法に関して、安全性と信頼性の両方の観点から重要情報を選定する方法が表 3.2.1、表 3.2.2 に示すように研究されている。不具合情報に含まれる根本原因機器に着目して、機器重要度を分類する方法であるが、これは原子力発電所の保守管理における機器重要度分類を、確率論的評価手法を用いて作成する際にも応用できるとされる[14,15]。

しかしながら、FV 等の確率論的指標値は、論理的に決定できるものではなく、エンジニアリング・ジャッジメントによりそれぞれの組織が決定するものである。

表 3.2.1 重要度指標の計算方法[14,15]

Birnbaum	B=F(1)−F(0)
Fussell Vesely	FV=(F(x)−F(0))/F(x)
Risk Achievement Worth	RAW=F(1)/F(x)
Risk Reduction Worth	RRW=F(x)/F(0)
F(1)は対象システムや機器の故障確率を1とした場合の炉心損傷頻度 F(0)は対象システムや機器の故障確率を0とした場合の炉心損傷頻度 F(x)はオリジナルの炉心損傷頻度	

表 3.2.2 Fussell Vesely と Risk Achievement Worth の持つ意味[14,15]

Fussell Vesely：対象機器やシステムの故障確率を 0 とおいた時に，炉心損傷頻度の低下しやすさを判断する指標である．具体的には，下記のことがいえる．この指標の値が大きいシステム/機器は，改善対策の効果（炉心損傷頻度の低下）が大きい．
Risk Achievement Worth：対象機器やシステムの故障確率を 1 とおいた時に，炉心損傷頻度の増加しやすさを判断する指標である．具体的には，下記のことがいえる．この指標の値が大きいシステム/ 機器は，不具合が発生した場合の影響（炉心損傷頻度の増加）が大きい。

②LEAF における重要機器の抽出方法[16,17]

LEAF は設備劣化の要因を網羅的に拾い出すために、機能展開を行い、それぞれの構成要素に関し特定の劣化がどのようなメカニズムで進展するかを故障物理によって想定し、

劣化現象を表現する数学的なモデルを同定して、そのパラメータを日常の設備管理業務で管理するという構造である。それぞれの段階で必要な情報を手順の流れに沿って示したのが図 3.3.8 である。この基本的な機能は、機能展開を行った結果として整理された各部品について、使用条件として該当するストレス因子から起こりうる劣化モードを故障物理データベースから抽出し、その影響として表れる故障モードを拾い出すと同時に、利用可能な寿命予測手法によって寿命の目安を評価してどの部品のどの劣化モードがクリティカルであるかを明らかにするものである。このクリティカルコンポーネントは、確率論のように危ない故障を優先するのではなく、例えばガントチャートのように時間軸上にすべての故障の余寿命を並べて、一番早く出てくると予想される故障を優先的に管理することを可能とする。

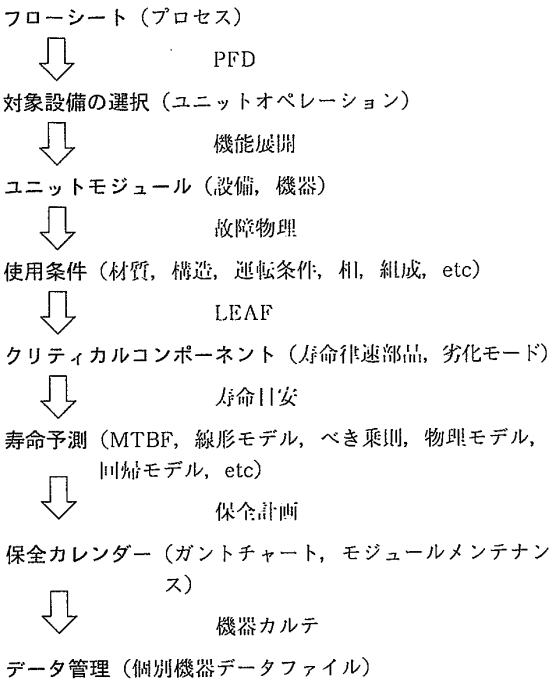

図 3.2.8 LEAF による設備管理の手順 [16)]

網羅的というのは、すべての劣化を対象とすることであるから、すべての劣化モードを考えると膨大な数になる。このため、何らかの方法によってそれを絞る必要がある。その一つの方法は故障物理に基づいて、対象の設備の条件では起こり得ないことが分かれば、対象から排除することができる。また、寿命予測によって何時頃起きるかという予想が付けばそれまでは管理の対象から外すことができる。このようにして寿命予測と故障物理の両方から絞ってくる。こうした作業は、人間が行うには限界があるので、当然コンピュータを使った管理方式にならざるを得ない。

寿命予測の手法に関しては、いわゆるシミュレーションのような詳細なモデルが用意さ

れていることは望ましいことではあるが、設備管理における寿命予測の目的は、正確な寿命の追求よりはむしろ設備の保守の時期を確実に決定することにあるので、必要最小限で簡単なモデルで十分であるともいえる。

以上の手法については、第 1 章で述べたが、幾つかの機器について開発が行われており、一部は実用化されている。

(4) ライフサイクルコストを考慮した保全計画選定への適用

ライフサイクルコスト(LCC)は、社会資本においての導入事例があり、わが国では、「シミズ土木アセットマネジメントシステム：清水建設」、「LCC 算定システム：ゼネコン 13 社」、「LCC 評価システム/オルケス：大日本土木」、「DIALLC：富士通エフ・アイ・ピー」などがある[18]。コンクリート構造物の劣化予測や補修方法などによる LCC を評価機能としている。しかしながら、生産施設に対する適用はほとんど報告されていない。

LCC 解析とは、「製品(設備)の発案から廃棄までもしくはその一部分の期間に発生するコストの経済性評価」である。一般的な経済性評価と LCC 解析の差違は、信頼性工学の適用にある。

信頼性工学における LCC について、宇宙ステーションのポンプの LCC モデルが検討されている[19]。ポンプの LCC は取得コスト C_i と故障確率 P_i および故障による損害 C_f を用いて次式で表せる。

$$LCC = C_i + P_i C_f$$

ここで、$C_i=20\exp(0.223\beta)$、$P_i=1/2^{0.5}\exp(-\beta^2/2)$ である。

β は、安全指数と呼ばれるものである。従来、設備設計には、安全率 SF＝S/L（S：破壊強度、L：負荷）が用いられてきたが、これは強度 S や負荷 L のバラツキなどが考慮されておらず、技術的にきわめて不十分な設計指標である。これを改善するため、リスク解析においては、β と同一であるが次式で示される安全指数(SI：Safety Index)が使用される。

$$SI = \frac{\mu_S - \mu_L}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_L^2}}$$

SI は、設備診断技術において正常分布と異常分布の乖離度の尺度、つまり診断精度の尺度「識別指数」として使用してきた式と同一である。これが安全指数 SI として、リスク管理工学に逆導入された。このようにして、最適な設計安全指数 と故障確率、取得価格、期待ライフサイクルコストなどを求めることが出来る。リスク管理工学や設備診断技術で開発された計算法を逆輸入することにより、設備のライフサイクルの評価法が示された[20,21]。

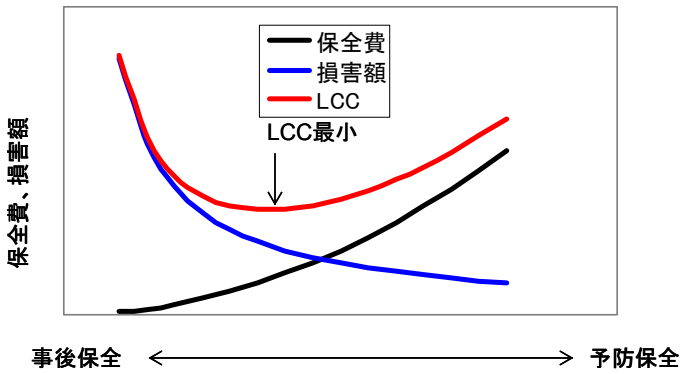

図 3.2.9 LCC と保全計画の例

LCC は製品の企画､開発から運用、廃棄までの全ての期間を考え、その間に発生するコストの総和を取ることが基本となっている。図 3.2.9 は、保全戦略と LCC の関係をモデル的に例示したものである [22)]。横軸は保全、検査の戦略を概念的に示している。左端は事後保全を、右端は故障が発生する前に交換、補修を行う予防保全を示している。事後保全の行き過ぎは安全性を損なうが、一定の安全性が確保されれば、経済原理に従って保全戦略を定めることは合理的である。

この例示においては事後保全では保全費は少ないが、故障が発生した場合の修理費、生産ロスによる損失額が大きくなりそれらの総和の LCC は高い。逆に、予防保全の行き過ぎは､生産ロスの損失額は小さいが､保全要員や保全費の増大から LCC は増加する｡そこで、LCC を最小にする予防保全の程度を探すことになる。実際の定量化には困難が伴う。損害額の定量化については、逸失利益を、機器の故障により生産品が低下した場合、本来その生産量の販売で得られたであろう利益を損失とみなす考え方がある。機器の信頼性と保全の程度に応じた設備の非稼働率を算定することで、生産品の低下の定量化を行うものである。保全費用は、保全の固定費とランニングコストに分けられるが、固定費は予防保全の程度を上げれば増加する。また、ランニングコストは検査、保全の頻度と一回あたりの費用で算出される。

しかしながら、LCC は、個別機器の改良保全では検討されるものの、日常的な PDCA には入っていない。これは、設備劣化・故障の予測と生産や製品品質への影響などについて、どこにどれだけのリスクがあり、どの程度効果があるのかを算定できないために、現実には LCC の算定は難しいものとなっている。機器の部品・部位レベルでの寿命予測が自動的に算出されることが望まれる。

3．3 まとめ

(1) 米国ではわが国に比べて早くから設備の維持管理基準の検討がされてきた。米国機械学会(ASME)では圧力容器に関して、石油学会(API)では石油プラントの維持規格について検討し、制定してきたが、最近では、両者の合同委員会なども進められ、米国では API 及び ASME とも維持規格の体系が整備されてきたといえる。

わが国においても、原子力発電の維持規格が日本機械学会により 2000 年に制定された。規制緩和の動きと共に、設備の自主保安の動きが加速されてきた。この規制緩和と自主保安は、形式的や建前論に片寄りがちな安全規制から実効性を重視した安全規制への転換が促進されることとなり、このためには、国民の英知を結集して安全の根幹である科学的合理性を追求・活用することや、民間規格=学協会規格策定に産・官・学が協力する体制の強化に一層努めることが必要である。

(2) 経営戦略的なシステムとして、ROA の視点を取り入れてステイクホルダーの利益を最大化するための設備保全が求められている。背景として、保全の経営的な評価を行うこと、装置産業においては高経年設備が増加し、且つ保全の人材が確保できにくい事情から今後の保全の実行に課題があることがあげられる。CMMS/EAM 等の保全業務の PDCA サイクルを実行するためのシステムや仕組みが存在することを前提として、それらのシステムから保全データを取り込んで評価し、戦略化するというより大きな PDCA を行うことによって新たな戦略システムとすることが進められている。

参考文献（第 3 章）

1) http://www.osha.gov/SLTC/processsafetymanagement/standards.html
2) 松本俊次：電子情報通信学会技術研究報告, vol.104, no.761, p.21-24, 2005.3
3) 田原隆康：配管技術, vol.149, no.6, p.21-31 , 2007
4) 大ケ生靖：出光技報, vol.50, no.3, p.252-258, 2007.10
5) 山口明久：化学装置, vol.47, no.12, p.72-76, 2005
6) 班目春樹, 他：日本機械学会誌, vol.106, no.1013, p.290-296, 2003
7) 豊田利夫：私信
8) 岡田邦雄：計装, vol.50, no.3, p.72-76 , 2007
9) 木村好次, 他：経営にための保全学, 社団法人日本プラントメンテナンス協会, 2006
10) 藤井彰, 他：日本機械学会第 7 回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, p.70, 2008
11) 八竹英紀, 他：日本機械学会第 7 回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, p.62,

2008、八竹英紀, 他：日本設備学会創立 20 周年記念大会論文集, p.119, 2008
12) 宮健三：日本機械学会第 7 回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, p.1, 2008
13) 黒岩重雄：計装, vol.50, no.3, p.64-67, 2007
14) 嶋田善夫、宮崎孝正 ; 確率論的評価手法を用いた原子力発電所の重要な不具合情報の抽出方法、INSS Journal, vol.12, p.118, 2005
15) 嶋田善夫;確率論的安全評価による安全上重要な海外原子力発電所不具合情報抽出方法、INSS Journal, vol.11, p.187, 2004
16) 大島榮次：火力原子力発電, vol.55, no.4, p.356-373, 2004
17) 大島榮次：ペトロテック, vol.25, no.9, p.702-707, 2002
18) 財団法人エンジニアリング振興協会:産業資本施設メンテナンスの投資効果評価手法に関する調査研究, p.32, 2008.3
19) 豊田利夫：私信
20) ROBERT J.LATINO et. al: ROOT CAUSE ANALYSIS,CRC Press,1999
21) 豊田利夫：IT 時代の設備管理と予知保全、プラントエンジニアリング
22) Anthony Kelly：Maintenance Strategy, Butterworth Heinemann, p.98, 1997
23) ANDREWS S, MATUSHESKI B：Hydrocarbon Process , vol.81, no.3, p.79-80,82, 2002
24) NORDMAN D J, MEEKER W Q：Technometrics, vol.44, no.1, p.15-23, 2002
25) 川内陽志生：最新保全技術研究会, 第Ⅲ期報告書, p.55, 社団法人日本プラントメンテナンス協会, 2008

第4章　設備診断技術の動向と設備管理技術

4．1　予防保全の課題

4.1.1　予防保全と最適保全周期

(1) 予防保全 PM(Preventive Maintenance) とその基本思想 [1)]

1950 年代の始めに予防保全 PM(Preventive Maintenance)が導入されたが、1960 年代後半から 1970 年代初期にその欠点を是正する目的で、現在の主要な保全方式となっている「全員参加の予防保全 TPM（Total Preventive Maintenance）」、「予知保全方式 CBM（Predictive Maintenance or Condition Based Maintenance)」、および「信頼性保全 RCM(Reliability Centered Maintenance)」が開発もしくは導入された。

1960～1970 年代

①予防保全方式(Preventive Maintenance : PM)
②全員参加の予防保全(Total Productive Maintenance : TPM)
③予知保全/状態基準保全(Predictive Maintenance/ Condition Based Maintenance : PM/CBM)
④信頼性中心保全(Reliability Centered Maintenance : RCM)

1980～1995 年代

①設備生涯保全工学(Life Cycle Maintenance : LCM)
②保全管理コンピュータシステム(Computerized Maintenance Management System CMMS)
③リスク管理検査システム(Risk Informed Inspection : RII)

1995～現在

①プラント資産管理システム(Plant Asset Management : PAM)
②企業資産管理システム(Enterprise Asset Management : EAM)
③遠隔広域企業資産管理システム(web-Based Enterprise Asset Management : web-EAM)

図 4.1.1　設備診断関連技術の歴史

1980 年代から 1990 年代の前半にかけて、設備の生涯コストを最適化する「ライフサイクル保全 LCM(Life Cycle Maintenance)」、「設備保全コンピュータシステム CMMS (Computerized Maintenance Management System)」、ついでリスク管理点検技術 RII (Risk Informed Inspection) が導入された。1990 年代の後半以降は、従来の設備管理コンピュータシステム CMMS が企業資産管理システム EAM(Enterprise Asset Management) へ、予知保全システム CBM が「プラント資産管理システム PAM (Plant Asset

Management)」と進化し現在に至っている。

予防保全 PM とは「運転中の機器またはシステムの機能を維持するために、事前に計画された特定の範囲に対して定められた時間内に行う点検活動と保全作業の遂行」と規定されている。この定義における”事前に計画された(preplanned)”が重要で、この思想は現在盛んに欧米で導入が検討されている「プロアクテイブ保全 PRM(Proactive Maintenance: PRM)」や日本における改良保全（欧米には存在せず）に通じるものである。

PM の目的は、①故障を防止するため、②故障の発生を検出するため、③潜在故障を発見するためとされる。その基本目的に故障の事前検出を含んでいる。

(2) PM の特徴 [2)]

PM は設備が経時的に劣化するという図 4.1.2 に示す Bath-Tub 曲線を前提としている。すなわち、保全対象の設備機器の故障率が Bath-Tub 曲線の右上がりの年齢依存型特性を持つときだけにおいて意味を持つ。しかし、この劣化は時間的なバラツキが大きいため PM では定期点検や分解検査が重要視されてきた。

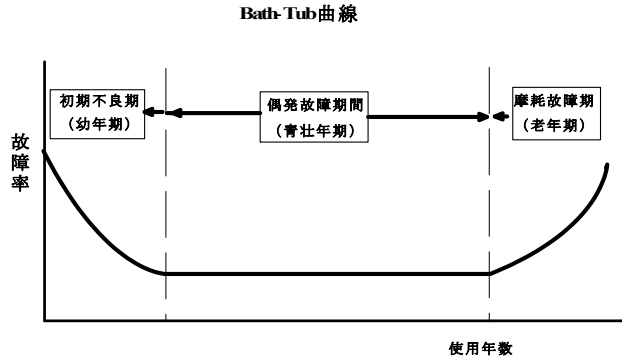

図 4.1.2 機械の時間的劣化特性を示す Bath-Tub 曲線

最適な保全周期や点検周期は、単位期間の総合保全コスト C(T)（事後保全コスト＋予防保全コスト）を最小とする保全周期 T である。対象設備の信頼度関数を R(t)、Cb を事後保全コスト、Cp を予防保全コストとすれば、次の(a)式を最小とする周期 T_* として求まる。

$$C(T)=\frac{C_b(1-R(T))+C_pR(T)}{\int_0^T R(t)dt} \qquad \text{(a)}$$

(a)式を最小とする保全政策が最適保全政策であり、最小とする T が最適保全周期である。(a)式より、次の(b)式を得る。

$$\lambda(T)T-\{1-R(T)\}=\frac{Cp/Cb}{1-Cp/Cb} \qquad \text{(b)}$$

信頼度 R(T)を、形状母数をもつワイブル分布と仮定すれば(b)式を数値的に解く事が出来

る。当然ながら(b)式の解が存在するためには

①劣化特性が年齢依存型であること、すなわち図 4.1.2 でα＞1 であること。

②予防保全コストが事後保全コストコストよりやすい、つまり Cb＞Cp のとき以外は解が存在しない。

図 4.1.3 は総合保全コスト C(T)を評価関数としたときの、最適予防保全周期を示す。図より予防保全が意味をもつのは劣化特性が年齢依存型であること、つまりα＞1 が必要であり、そうでないときには、最適保全周期 T は無限大、つまり「予防保全しないほうが儲かる」ことを意味している。

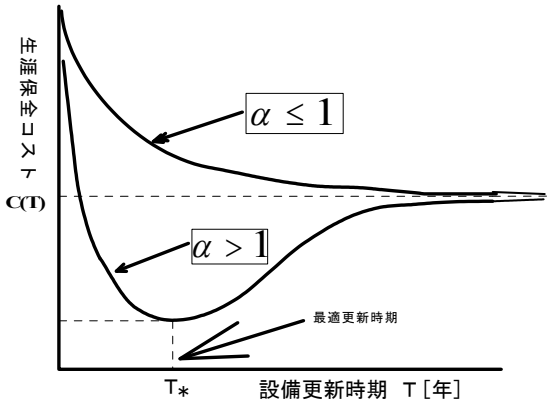

図 4.1.3 総合保全コストと最適保全周期

このように、PM における保全周期や点検周期など基本政策が理論的に計算可能となったが、これはあくまで、設備の劣化特性が摩耗型であること、言い換えれば図 4.1.2 の Bath-Tub 曲線が右上がりであることを前提としている。

4.1.2 予防保全の課題

予防保全 PM は本当に設備の信頼性向上に有効なのであろうか。定期修繕が逆に故障を増加させる原因になっているのではないか。このような現場管理者の根強い疑問に答えるために、米国の火力発電所で調査された記録があるが、58%以上の故障が定期修理作業後の 1 週間に集中しており、その後減少している結果であった。

米国において、機器の劣化・故障特性を調査するために専門家によるプロジェクトチーム MSG(Maintenance Steering Group)が編成され、航空機の機械部品の劣化特性の調査を行った。この調査結果は図 4.1.4 に示すように、89%以上の航空機用機械設備の劣化が時間依存型（Age-Related Deterioration）でなく、従来の時間基準予防保全(TBM)では効果がないことが示された。

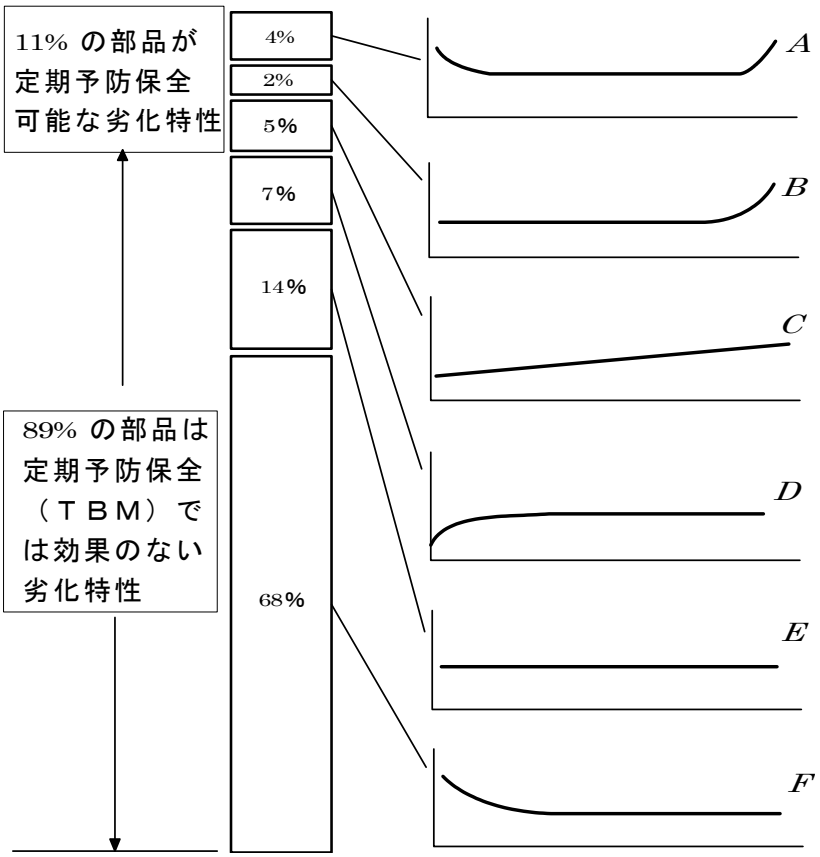

図 4.1.4 民間航空機の機械部品の劣化特性

得られた結果は以下の通りであった[3)]。

4%以下の機械部品の劣化特性が古典的な Bath-Tub 曲線に従う。劣化曲線に摩耗領域(aging region)を持つ 6%である（曲線 A、B)。直線増加型の曲線 C も摩耗型と見なせば、11%の部品が年齢依存型劣化特性となる。逆に 89%の部品劣化特性は年齢に依存しない。有効使用期間内では故障率は一定つまり故障は偶発型であることがわかる(曲線 D、E、F)。72%の機械部品が初期不良特性を持つ（曲線 A、F）が、この劣化特性を持つ機械に対しては定期保全がかえって故障を増加させるということになる。ここでは、設備診断技術による製造品質診断もしくは工事診断が重要であることを示している。最も多くの 68%の機械部品が初期時点で Bath-Tub 曲線と同様な特性をしめすが、年齢依存劣化領域を持っていない（曲線 F)。つまり 68%の機械設備に対しては、予防保全は無益（故障を減少させない）であるばかりでなく、有害（故障を増やす）であることになる。

このように、89%以上の機械部品の劣化は年齢に依存せず、古典的な定時予防保全 PM は無益であることがわかる。すなわち、①定期オーバホール（Scheduled Overhaul）は若干の例外を除けば航空機のような複雑な機械設備においては効果がない、②予防保全の方法が効果的でない（予防保全方法に無駄が多い）ことが指摘された。

この調査結果があまりにも衝撃的であったので再調査の要望が出され、米国の NASA を

中心とした保全関連組織体が、1978 年，1985 年，1993 年の 3 回に渡り同様の調査をおこなった。結果は図 4.1.5 に示すように 1968 年の第 1 回調査結果を補強するものであり、古典的な予防保全 PM が効果を発揮する機械設備の割合は 10%内外であることが判明し、「機械設備の劣化特性は Bath-Tub Curve に従わない」という確信を持たせるに至った。

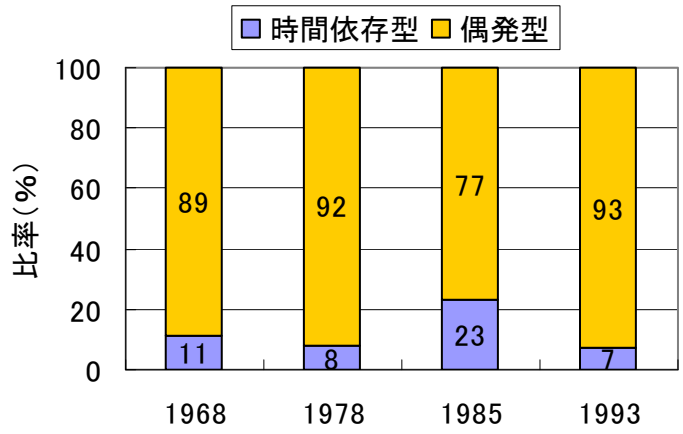

図 4.1.5 米国における機械劣化特性の調査結果

4．2　保全方式の進展

前述したような予防保全 PM の限界に関する調査結果が、現在の新しい保全管理手法を生み出したといえる。すなわち、①日本の組み立て産業において「全員参加の PM」すなわち TPM、②欧米と日本で開発された設備診断技術 CDT と予知保全 CBM、③米国で開発された信頼性中心保全 RCM、④日本の改良保全の進化と思われるプロアクテイブ保全、⑤予知保全 CBM の進化したプラント資産管理 PAM、などである。

本節では設備診断技術と関わりの深い予知保全 CBM と信頼性保全 RCM、およびプロアクテイブ保全 PRM の概要について述べる。

4.2.1　予知保全 CBM と信頼性保全 RCM

生産設備の大型化、複雑化、高速化にともない突発故障による損害が膨大なものとなってきた。また予防保全に要する保全コストも鉄鋼業や石油化学、および航空機などの運輸産業においては全売上高の 10%～20%に達し、経営上財務上の最大の障害となっていた。そのため、設備診断技術 CDT を信頼性保全 RCM の手法を用いて効率的に運用する予知保全方式が採用され、大きな成果を収めてきた。

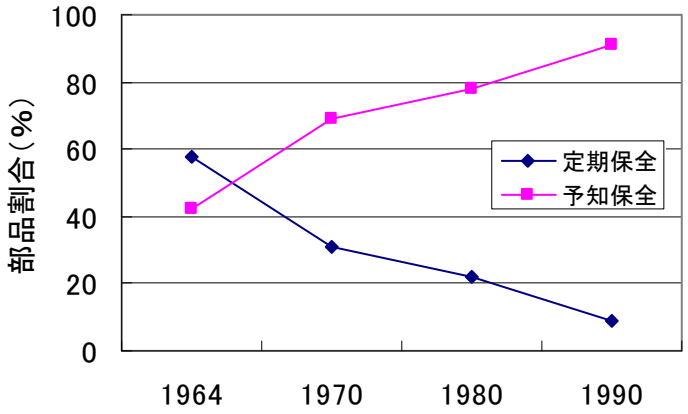

図 4.2.1 航空機機械部品の保全方式の変遷

図 4.2.1 は米国民間航空機の保全方式の採用状況を示す。1964 年当時は、定期予防保全が約 60%、予知保全方式が約 40%であったが、設備監視技術や設備診断技術の信頼性や経済性の改良とともに、RCM とリスク管理 RIM による予知保全方式の効率化が図られ、1990 年代では予知保全の採用率が 90%を越えるようになった。また、航空機の保全コスト削減における予知保全 CBM の効果も明確となった。

RCM は、時間基準予防保全の欠点を抜本的に改善するために生まれた手法であり、次の 4 ステップで進められる。

①システムの信頼性および操業情報の獲得および定義
②重要保全項目(Maintenance Significant Items ;MSI)の定義。すなわち安全性やコスト増加に連なる故障項目のリストアップ
③すべての重要保全項目(MSI)について、故障モード、原因、診断可能性の調査
④すべての重要保全項目(MSI)について、最適保全方法の選定、故障頻度の削減策、損害軽減方法の策定

RCM は、当初、民間航空機整備や軍用機器整備に導入されたが、一般産業界においても次の効果が期待できるとされている。
①保全のトレーサビリテイ(Traceability)
長期的観点から、保全に関わる意志決定や情報が正確に記述される点が最大のメリットとされる。
②コスト削減(Cost saving)
時間基準予防保全(TBM)によるオーバメンテの削減、予知保全(CBM)導入による保全作業量の削減、予備品在庫量の削減などに効果が大きいとされる。
③保全作業の合理化(Rationalization)
不必要な予防保全作業、未完成または管理なし保全作業の削減。食品工業での実例では RCM 導入前の保全作業量 24,000 man-hour を 12,000 man-hour に削減した実例がある。
④プラント改良(Plant improvement)
設備の故障原因や保全性不良原因の解明による設備改良。
⑤教育効果(Education)
全社員の技能技術とモラルの向上に効果がある。

4.2.2 プロアクテイブ保全

(1)プロアクテイブ保全の考え方

現今の設備管理コスト節減は、機械摩耗や故障の根本原因（root causes）に焦点を絞ったメンテナンスソリューションに向いている。デュポン(Du Pont)社によると、メンテナンスはプラントにおいて制御可能な最大の経費部門(maintenance is the largest expenditure in a plant)であり、多くの企業においてそれは年間の企業利益を超過している。設備保全コストを削減するためには設備そのものを劣化させないことが重要であるとの考え方で、劣化や故障を防止するための事前保全活動を総称してプロアクテイブ保全(Proactive Maintenance: PRM)という。これは劣化防止型保全であるといえる。これに対して、故障や劣化を見付けて対応する保全をリアクテイブ保全(Reactive Maintenance：RAM)という[1)]。

幾つかの欧米企業で、このプロアクテイブ保全 PRM を導入し、保全コストの劇的な削減が可能であることが報告されている。その基本的考え方は TPM でいう「原因系に遡れ」と

いうことであり、「原因系に設備診断技術を適用し、劣化や故障の原因を検出して除去する方式」である。欧米の文献によると「予知保全は故障の徴候を監視・除去するが、プロアクテイブ保全は故障の原因を監視・除去する」としている。海外文献ではプロアクテイブ保全を故障事前活動(failure proactive)、従来の予防保全を故障反応型(failure reactive)と表現している。

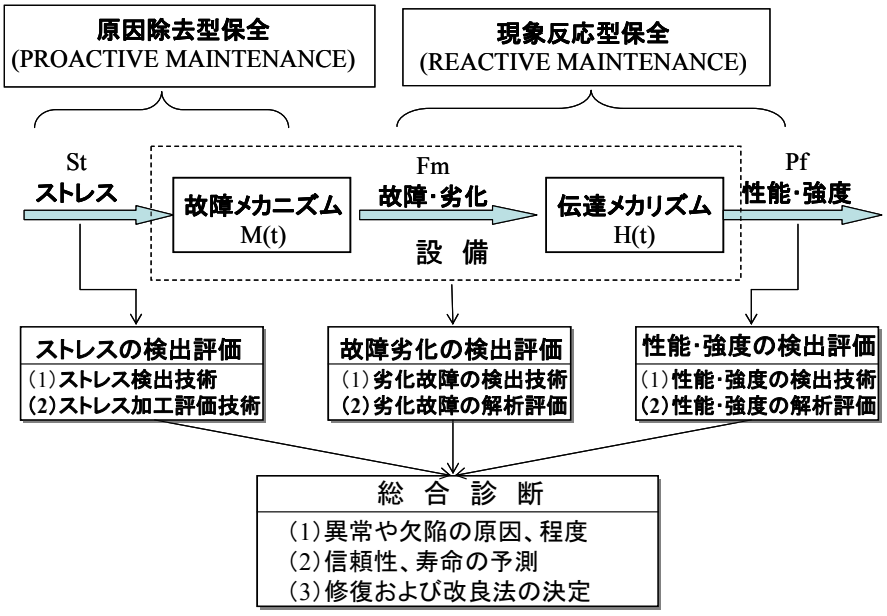

図 4.2.2 プロアクテイブ保全(豊田)

表 4.2.1 プロアクテイブ保全PRMと他保全方式の比較

保全方式	主要技術	医学との対応
プロアクテイブ保全 PRM (Proactive Maintenance)	故障の根本原因(failure root cause)系の監視と除去(例:油汚染監視と修正)	コレストロールと血圧を監視しダイエットすること。
予知保全 PDM (Productive Maintenance)	振動、温度、油中金属摩耗粉、アライメントなどの監視診断	心電図や超音波診断装置により心臓欠陥を診断
予防保全 PM (Preventive Maintenance	定期的オーバホールおよび部品交換	臓器移植またはバイパス設置
事後保全 BM (Breakdown Maintenance)	大きな生産損失と保全予算が必要	心臓発作が起こってから病院に駆け込む

プロアクテイブ保全では修正アクション(corrective action)のターゲットを故障の徴候

（failure symptoms）排除でなく故障の根本原因（failure root causes）の排除においている。したがって、その基本的な考え方は機械寿命延長のための保全活動であり、従来法のように、①故障していないのに安全のために修理する、②故障をルーチンまたは正常の出来事として受け入れる、③定期保全の名のもとに重要故障修理を先取りする、ことを排除しようとするものである。

米国においては、表 4.2.2 に示すように上位 1/4 のプラントにおいては、プロアクテイブ保全が 20%以上の導入が進んでおり、保全のパラダイムシフトが進んでいる。

表 4.2.2 米国における保全方式の採用事例 [5)]

保全戦略	上位 1/4 プラント	下位 1/4 プラント
プロアクテイブ/Proactive	＞20%	0%
予知/Predictive	＞45%	～12%
予防/Preventive	＞25%	～31%
事後/Reactive	＞10%	～55%

(2) プロアクテイブ保全の実際例／流体機械・潤滑システム

プロアクテイブ保全の基本は日本から学んだとされる。すなわち、①新日本製鐵名古屋製鉄所の油圧系統汚染管理プログラムによりポンプの取り替え頻度を 1/5 に削減した例、②旧川崎製鉄において、油圧系統の汚染管理プログラムにより 97%の故障を削減した例が報告されている。現在本法が適用されているのは主として油圧系統や潤滑系統であって、プロアクテイブ保全への第 1 ステップは、潤滑油、作動油、ギアー油、トランスミッション液などの汚染管理プログラムの整備である。

故障の根本原因は、多くの場合その故障形態により隠蔽され、その形態自体が原因とされることがある。例えば、軸受の突発故障は多くの場合は潤滑不良で片づけられるが、根本原因は潤滑油の汚染（フィルタ不良を含む)、もしくは軸受の取り付け不良にある。TRW の報告によると、軸受損傷の第 1 の根本原因は潤滑油汚染であり、軸受の 90%は設計寿命以前に故障している。

プロアクテイブ保全は次のステップで行われる。

①機械油系統の目標清浄レベル TCL(target cleanliness level)の設定

②目標清浄レベル TCL を実現するためのフィルタ設備と汚染除去設備の選定

③清浄レベルの定期監視と診断・予測

(3) プロアクテイブ保全の実際例／回転機械システム

回転機械の故障/過剰振動の原因は、ミスアライメントが 50～70%、アンバランスが 30～40%、その他 10%との報告がある。図 4.2.3 に示すように、ミスアライメントは軸受寿命を指数関数的に短縮することが報告されている。劣化原因の定期的除去を行うためにア

ライメントチェックを定期的に実施することが有効である。

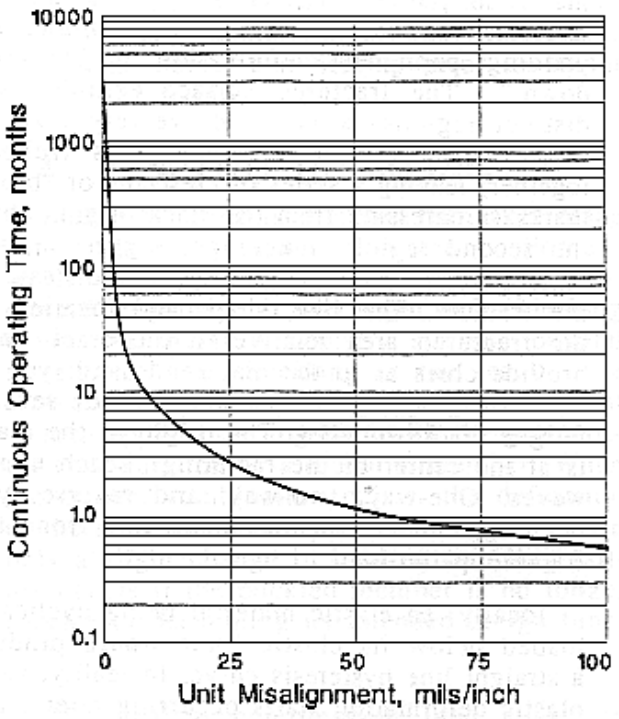

図 4.2.3 ミスアライメントによる回転機械の寿命短縮

4．3 設備監視診断の進展

設備診断は過去に様々な手法が開発され、実用化されてきた。主要な設備診断事業を以下に示す。最近は 1 社によってこれら全てを実施できるようになり、各種の設備診断技術の総合化・システム化が進められている。この結果、精度の向上や設備診断データによる寿命予測などの新たな展開が検討されている。本節ではこのような背景から、新しい設備診断技術の動向と設備診断アルゴリズムの進展について概観する。

表 4.3.1 設備診断事業

① PAM ソフトウエア(Plant Asset Management software)
② 振動解析(Vibration Analysis)
③ 無線監視(Wireless Monitoring)
④ 連続オンライン監視(Continuous Online Monitoring)
⑤ 油分析(Oil Analysis)
⑥ 赤外線サーモグラフィ(Infrared Thermography)
⑦ 電動機診断(Motor Diagnostics)
⑧ 非破壊検査(Non-Destructive Evaluation)
⑨ 超音波検査(Ultrasonics)
⑩ 機械のバランシングや芯出し等の修復技術(Corrective Tools)
⑪ 顧客実務教育・資格認定教育および訓練
⑫ 関連専門研究会の主催

4.3.1 新たな設備診断技術の例

(1) 性能・効率・エネルギーの監視診断技術

ポンプなどの流体機械のライフサイクルコストを見ると、エネルギーコストが 95%と最も高く、ついでメンテナンスコスト 5%、原価償却 1%となっている。欧米ではライフサイクルコストの観点から設備監視診断技術を省エネルギー目的に使用した製品が高い伸び率を示している。すなわち、ポンプの圧力、流量などを常時監視診断して、オンラインで効率を計算し、常に最高効率で運転することにより、エネルギーコストを 10～20%削減した例が報告されている。このような、運転情報を監視して、プラントの最効率運転を目指すシステムが PAM であるが、PAM システムの重要な機能として性能・効率・エネルギーの監視診断技術が発展するであろう。

(2) スマート構造物の出現とその知的監視技術 [6)]

21 世紀の日本は橋梁や隧道、上下水道や大型ダムなどの公共施設が建設から保全の時代

に突入すると言われている。この方面の先進国である米国では、このような大型構造物の保全技術と知的監視診断技術の研究が盛んである。スマート構造物(smart structure)とは体系化された監視用センシングシステム(structurally integrated sensing system)を持った構造物である。スマート適応構造物(smart adaptive structure)とは、センサー情報により構造物状態を制御出来る構造物をいう。知的構造物(intelligent structure)とは、センサー情報により構造物を制御し、かつ過去の経験により学習が可能な構造物である。このような、新しい構造物の実現には、構造物監視診断技術が必須技術となる。なかでもセンサー技術が重要で、生産機械の監視診断用に開発された従来の診断用センサー技術と異なる側面を持つ。

著しい特徴は、オプチカルファイバーによる応力分布や腐食など構造物に多い劣化の監視診断用センサー群が多数研究されていることである。これらのオプチカルファイバーによる応力分布や腐食など構造物センサは逆輸入して産業機械の監視診断にも有効に適用可能である

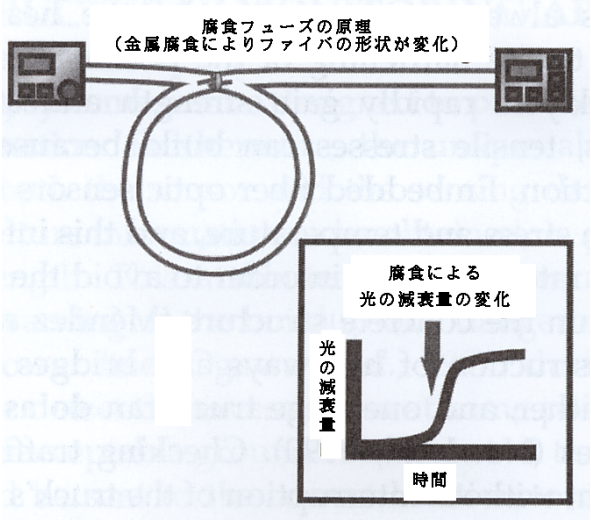

図 4.3.1 構造物監視用の腐食フューズ [6)]

図 4.3.1 はオプチカルファイバーを用いた構造物の「腐食フューズ(Corrosion Fuse)」といわれるセンサーで、鉄筋棟の任意箇所の腐食が規定の量に到達したときに警報を発生するものである。腐食フューズ(Corrosion Fuse)の特徴は、構造物ポイントの腐食ではなく、構造物の長さ方向の任意箇所の腐食に反応して警報を発することができることである。

抵抗薄膜光材料や光ファイバーを用いた応力分布測定ゲージが開発されている。いづれも、橋梁やケーブルの長さ方向（２次元）の応力分布の遠隔監視が可能である。

4.3.2 新しい設備監視診断アルゴリムの紹介 [7)]

IT の進展とともに診断に係わるハードやソフト、通信手段が整備されてくると、その中

核となる診断アルゴリズムが重要となる。逆に言えば、どのような診断ソフトウエアも内部に高精度でロバストな診断アルゴリズムを内臓していないと意味がない。以下に、注目される設備診断アルゴリズムを示す。

(1) 無次元特徴パラメータによる簡易診断 [8)]

設備診断技術は、異常の有無を診断する簡易診断技術と異常の種類や原因を同定する精密診断技術に分類できる。このうち、保全実務上は、機械のオペレータや点検員が“設備が正常か異常か”を当てる故障検出機能が最も重要かつ基本的機能である。

異常は、①構造型異常、②摩耗型異常、③自励型異常に分類できるが、振動波形とその確率密度関数は図 4.3.2 に示すようにそれぞれ特徴のある形状を呈する。したがって、振動の大きさを無視した（振動の実効値が 1 となるように正規化した）複数の無次元特徴パラメータの適用が有効である。

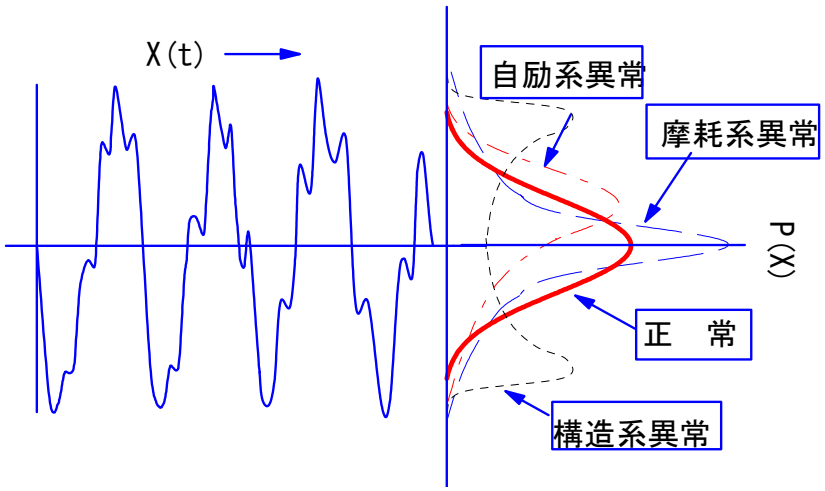

図 4.3.2 回転機械の振動波形と異常の関係 [8)]

回転機械の状態を予測するには、その状態変化に対して鋭敏に反応するパラメータが必要となる。そこで運転条件の変化の影響を受けにくい、標準値や判定基準値が常に一定に設定できるなどの利点を持つ無次元兆候パラメータを状態予測用兆候パラメータとして、歪み度と尖り度を定義する。

①歪み度と尖り度は機械が正常ならばともにゼロを示す。

②異常が発生すると歪み度と尖り度が大きくなる。

これは機械の負荷や回転数、サイズ（大型／型）に関係しない。このような無次元特徴パラメータを使用し、歯車に局所摩耗が発見された後、約 3 週間おきに採取された加速度振動に対して歪度，尖り度を求めたデータを図 4.3.3 に示す．測定回数 6、7 は歯車交換後の値である。

これらの結果より状態予測用兆候パラメータは、一般に機械が正常状態であれば、ある値のまわりをランダムに変動するが、ひとたび故障が発生すると故障の進行とともに変動しながら増加していくということが推測される。

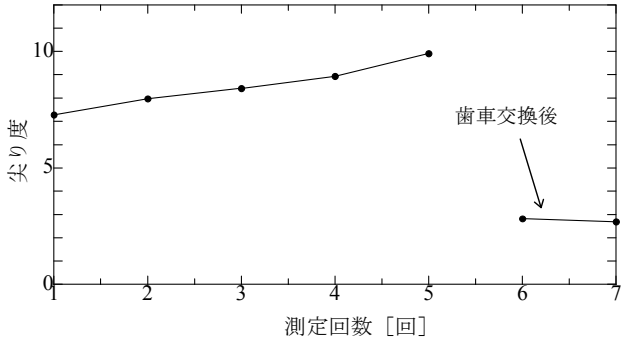

図 4.3.3 尖り度による歯車摩耗の劣化傾向管理（データは三菱化学（株）殿の提供による）

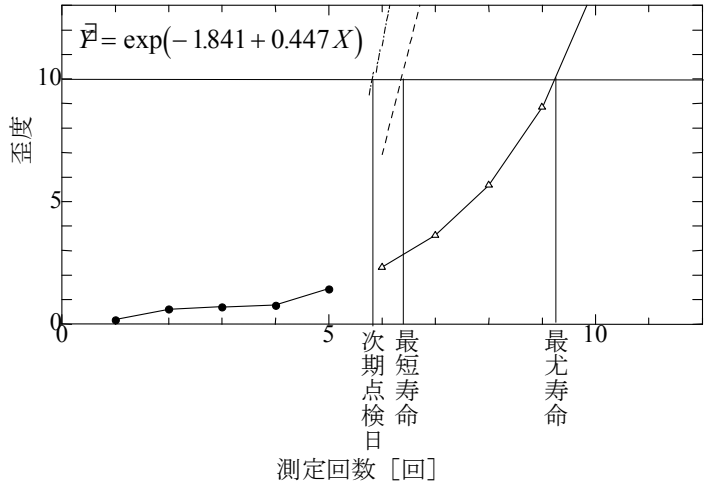

図 4.3.4 歯車の次期点検日,修理指定日および最尤寿命の予測

図 4.3.4 は歯車の局所摩耗による劣化過程を線形回帰式により予測した結果である。これらの予測は、歯車交換前のデータのみを用いた。また、予測個数は 4、予測値信頼限界は 95% である。ここに紹介した方法は、従来の線形予測法を設備状態予測用に改良して適用したものであるが、最尤寿命点が予測できること、最短寿命点が予測できること、次期点検日が指摘できることなどの利点がある。これにより劣化傾向管理による予測技術が現場要求に応えられるレベルに到達したと言える。

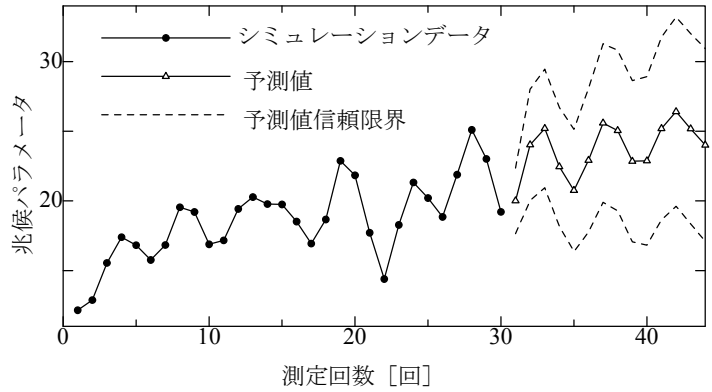

図 4.3.5 ARIMA モデルによる振動解析と寿命予測

このような設備診断技術による寿命予測は、兆候パラメータの記憶保持型予測技術への発展がある。図 4.3.5 は ARIMA モデルによる回転機器の振動データから寿命予測したものである。さらには、機械の据付時に振動信号から応力を推定しておき、寿命予測をすることも検討されている。

(2) 多変量解析による簡易診断技術 [7)]

複雑なプロセス異常診断を目的とするシステムでは、電流、速度、制御変数、品質情報など極めて多数の状態変数が必要となる。また機械が複雑となり故障の種類が多くなると、単一信号、例えば振動信号だけでも、必要な無次元特徴パラメータの数が多くなる。このような問題に対処するため、最近は多変量解析理論による精密診断アルゴリズムも開発されている。

パラメータ数が多いと劣化傾向管理や故障検出が面倒であるから、多変量解析法の主成分分析法を用いて少数の兆候パラメータに統合することを考える。図 4.3.6 は主成分分析法による特徴パラメータ統合の原理を示したものである。測定された多数の変数の情報は、直交する（情報のダブリがない）2 本の主成分 Z1、Z2 で表現される。設備が正常ならば 2 個の主成分 Z1、Z2 が内部の小楕円の内側にあり、注意状態ならば小楕円と大楕円の中間に存在する。測定された Z1、Z2 が大楕円の外側にあれば危険状態と判定される。また、直交座標の各象限は直交主成分の特性を示すから、点がどの象限（位置）に存在するかで、異常の種類を推定することが出来る。単独の無次元特徴パラメータに比較し異常の分離性能が格段に向上することがわかる。歯車の磨耗を検出した例が報告されている。

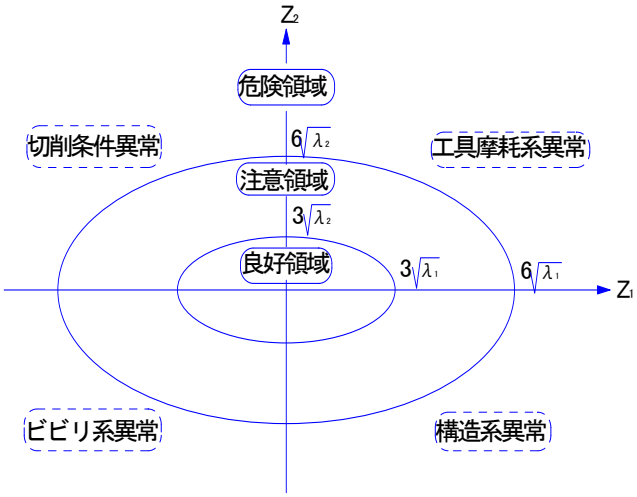

図 4.3.6 特徴パラメータ統合による異常診断

(3) 最近のメタ戦略（Heuristic Strategy）を用いた精密診断アルゴリズム

ファジー理論（Fuzzy)、ニューラルネットワーク(Neural Network)、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm)、遺伝的プログラミング(Genetic Programing)などの理論を一括してメタ戦略(Heuristic Strategy)と称する。メタ戦略理論によると、①複雑な非線形の数式も容易に解けること、②理論的に一部矛盾するような過去の経験も考慮できること、③学習や知識取得に優れた性能を発揮することが可能なため非常に高精度かつ知的で柔軟な診断アルゴリズムを構築できる。

・ファジィ推論による異常診断 [8)]

現場での設備診断において，設備の明確な故障メカニズムやそれに対応する兆候群の理論的挙動などが不明である場合が多い。このような場合はファジー理論による診断が有効である。またファジー理論を用いた最適保全政策理論も研究されており、十分に実用に耐える理論が完成している [1)]。

・ニューラルネットワークによる自動異常診断 [9)]

ニューラルネットワークは数値データの処理に強く、データの学習と自己組織化能力に優れている。ニューラルネットワークによる異常診断は次の利点がある。①未学習の異常についても連想 NT を用いることにより異常の識別ができる、②多変量解析との併用により，診断の信頼区間や診断精度を導入できる。

・遺伝的アルゴリズムによる異常診断 [9)]

故障状態を敏感に反映する最適兆候パラメータを遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorism：GA) により自己組織的に抽出する方法である。遺伝子を設定することで、交差、突然変異などの GA の操作を行うことができる。

GA では、各世代における個体の優劣を判定するのに適応度を用いる。診断では、兆候パラメータの異常識別感度を表す「識別指標 DI」を適応度とし、識別指標が高い個体を次世

代に残す。異常診断に用いる識別指数 DI は分布間の乖離度を示し、これが DI≧3 なら見逃し率は 0.03%以下である。自動生成された最適兆候パラメータの計算式を用いると、ほぼ100%の識別指数をもつ高精度診断が可能であるとの報告がある。ミスアライメントの検出率はほぼ 100%に向上し、従来法に比較して傑出した診断精度を得ている。

4．4 まとめ

設備診断技術は設備管理技術の重要な部分を構成している。設備診断技術を視点として設備保全や設備管理技術の展開について述べた。まず、事後保全から次に展開したのは予防保全 PM(Preventive Maintenance)であるが、この予防保全には経年劣化による故障への対策のみに有効であるとの理論的欠陥があり、それを克服するために予知保全 CBM(Condition Based Maintenance)、および信頼性保全 RCM(Reliability Centered Maintenance)が誕生した。さらに、日本でいう改良保全の欧米版と思われる劣化原因除去型保全であるプロアクテイブ保全 PRM(Proactive Maintenance)が設備保全戦略として提案された。プロアクテイブ保全 PRM は現在欧米で盛んに議論されている方式であるが、設備診断技術の原因系への適用成果として評価できる考え方である。これらの関連技術を包含したシステムとしてプラント資産管理システム PAM がある。

最後に、設備診断技術の最近の新しい技術を述べた。設備診断は過去の様々な手法が開発され、実用化されてきたが、最近は 1 社によってこれらの多くを実施できるようになり、各種の設備診断技術の総合化・システム化が進められている。この結果、精度の向上や設備診断データによる寿命予測などの新たな展開が検討されている。

参考文献（第 4 章）

1) Anthony Kelly：Maintenance Strategy, Butterworth Heinemann, 1997

2) Anthony H Smith：RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE, McGraw-Hill, 1993

3) Nowlan F. Stanley, and Haward F.： Reliability Centered Maintenance, National Technical Information Service,Report, No. AD/A066-579, December 29, 1978

4) Mohammad Modarres at al.：Reliability Engineering and Risk Analysis, Marcel Dekker, Inc.1999

5) Robert DiStefano, John Schultz：Society of Maintenance & Reliability Professionals Survey; The Business Case for Reliability

6) Raymond M. Measures：STRUCTURAL MONITORING WITH FIBER OPTIC TECHNOLOGY, ACADEMIC PRESS, 2001.

7) 豊田利夫：最近の設備診断技術(CDT)と予知保全(CBM), 日本鉄鋼協会 計測制御システ

ム部会シンポジウム, 鉄鋼業における信頼性と設備診断技術, p17-21
8) EPRI RI-ISI REPORT : Application of EPRI RI-ISI Guidelines to CE Plant, TR107531
9) R.Keith Mobley, et al. : COMPUTER-MANAGED MAINTENANCE SYSTEMS, Gulf Publishing Company, 1998

第 4 章は豊田利夫*)氏の執筆原稿より作成したものです。

*) 日本設備診断研究所代表、九州工業大学教授、早稲田大学教授歴任、工学博士

第5章　今後の設備管理技術と新しい設備産業の展開

5．1 設備管理技術の要件と要素技術

(1) 設備管理技術の要件

無事故・低コストで既存のプラントを運営するためには、経年劣化以外に安全を確保するための社内規則やシステムの不備、従業員への不徹底、人的ミスの原因も考える必要がある。設備管理という観点から言えば、経年劣化による設備上の弱点を的確に把握し、当該部品・部位をタイムリーに取り替えることが最重要課題である。

設計不備や施工不良は原因が取り除かれれば、その問題は解決するが、経年劣化は避けて通ることが出来ない。しかも、全ての設備が時間の経過あるいは運転の繰り返しによって劣化を起こすことから、対象アイテムの網羅的な対応が要求される。保全作業の大部分が経年劣化の対応を目的としているが、それぞれの経年劣化現象がどのような速度でどのように進行するかが分かっている場合は殆ど無く、基本的にはそれが顕在化した段階で補修するという方法がとられてきた。

図 5.1.1 は、経年劣化のパターンを一般的に表したものあるが、現象の特徴や観測精度によって兆候期と加速期が観測されず健全期からいきなり故障に至る突発的な例など、組み合わせは様々である。どのようなパターンで劣化が進行するかを把握して、経年劣化を管理することは設備管理の効率化のために、更には安全管理上重要な問題である。

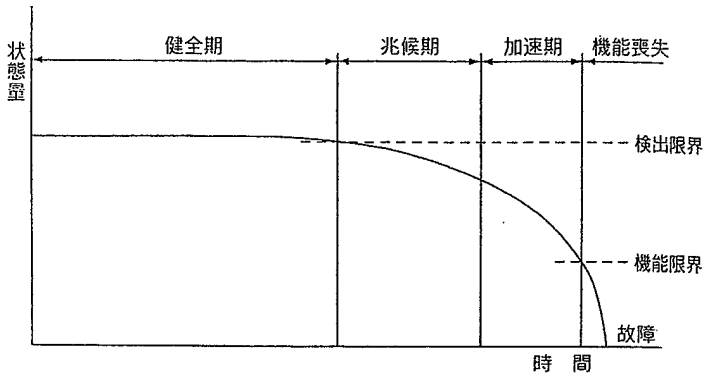

図 5.1.1 経年劣化の一般的パターン

最も単純なパターンは、初期から兆候期が始まり直線的に機能喪失に至る例で、途中経過を 2、3 点測定して外挿すれば寿命を予測することができる。これは全面腐食による管壁の減肉などに見られる。ベアリングのように健全期がかなり長く、やがて比較的短い加速期の後で故障に至る例では、何時から観測を始めるのかが設備管理上重要な問題となる。更に、健全期からいきなり機能喪失に至る、いわゆる突発故障は設備管理では最も厄介な問題であり、例えば電子回路の部品やフランジのガスケットの劣化がこれに該当するが、現

象は突発的でなくても、途中経過を観測する手段を持たない場合、あるいは放置している場合に現れる現象である[1)]。

設備の信頼性とは、その設備が何時故障するかを評価することであり、現実的には最も困難な問題であるという言うことが出来る。これは、設備の寿命には分布があり統計的な処理では限界があるためである。しかも、発電所のような設備ではタービンのように系列に一つしかない設備が多く、1 回でも故障すると致命的な結果となる。これに対して、故障物理に従って異常を想定し余寿命を予測する考え方は設備の評価に効果的であると期待できるが、現実には「誤差」がつきものであり予測は容易ではない。こうした原因による誤差をできるだけ排除し、設備の機能を正常に維持し、本来の生産性を確保するためには、設備の状態変化に柔軟に対応しながら、しかも計画的に設備管理を実施することが必要である。

そのための技術的条件は図 5.1.2 に示すように、4 つの基本的要素から成っていると言われている[2)]。すなわち、①網羅的（全ての劣化モードを対象としている）、②論理的（故障物理に基づいた現象の把握がなされている）、③予測的（寿命が定量的に予測されている）、④管理的（全ての劣化現象が確実に管理されている）。

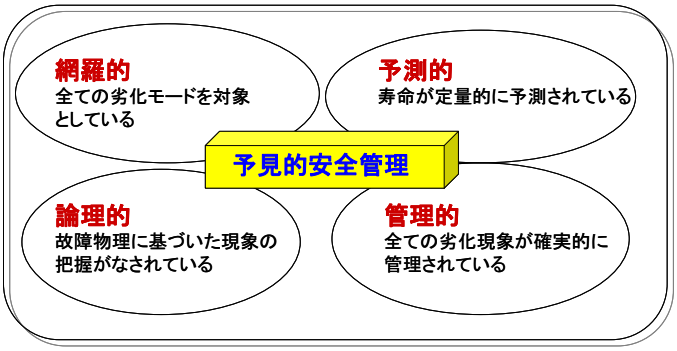

図 5.1.2 安全管理の技術的条件[2)]

(2) 設備管理技術を構成する要素技術

設備保全戦略が事後保全から予防保全を経て、最近の予知保全やプロアクテイブ保全に向かうことによって RCM、RBI/RBM、LEAF などの設備管理技術が展開されている。これらの要素技術の一覧表を表 5.1.1 に示す。設備診断技術や個別の故障物理は共通技術であるが、設備管理や保全戦略に直接関係するのは設備監視・診断技術であり、ここでは予知保全から登場した状態監視技術 CBM を取り上げた。また、危険度評価法はこの他にも RCM に利用されている LTA などもあるが代表的なものを掲げた。

表 5.1.1 設備管理技術を構成する主な要素技術一覧

		設備管理技術			共通技術
		RCM	RBI/RBM	LEAF	CBM
保全戦略	事後保全	−	−	−	−
	予防保全	−	−	−	−
	予知保全	○	○	○	○
	プロアクテイブ保全	−	−	○	○
アルゴリズム（危険度評価）	FTA	○	○	−	
	ETA	○	○	−	
	FMEA	○	○	−	
	GO−FLOW	−	−	−	○
	HAZOP	−	○	−	

5．2 各設備管理技術の特徴

RCM、RBI/RBM、LEAF の比較を以下に示す。

① 目的

RCM	・アイテムの機能故障の結果に根拠を置いて、系統的に保全計画の意思決定を行う。
RBI/RBM	・機器の機能故障のみでなく、故障したときの影響をも加味して、重点配備をしながら保全計画を策定する。
LEAF	・機器を構成する部品・部位の機能を阻害する要因を抽出し、部品・部位の寿命を予測し、管理すべきクリテイカルコンポーネントを抽出する。

② 機器・部品・部位の網羅性

RCM	・故障影響が波及する範囲を見極めるため、その関連性を網羅的に抽出し重要な機能を識別する（FSI)。 ・系を構成する重要な項目に対して、それを構成するアイテムの故障の可能性を故障モードとして抽出するために下位アイテムを分類する（SWBS)。
RBI/RBM	・保全計画を作成するときには、網羅的にリスク評価を行う。実行時には、優先順位を付けるので、リスクの小さいものは全く保全を行わないなど、ランク付けされる。
LEAF	・機器の機能を分類し、機能を構成する部品・部位に展開する（機器機能展開)。

③ 管理すべき部品・部位故障の抽出

RCM	・故障の影響を明確にするため機能やインターフェースを考慮して他の系にまたがるような故障を網羅的に抽出する(FFA)。
RBI/RBM	・リスクの大きいものから重要度で優先順位を付け、管理すべき項目を決定する。
LEAF	・機器機能展開された部品・部位と流体や環境条件から、関係する劣化モードを選び、寿命予測によって管理すべき部品・部位を抽出する。

④ 故障影響の明確化

RCM	・アイテムの機能故障を整理し、故障モードと故障影響を明確にする(FMEA)。
RBI/RBM	・故障影響に大きなウェイトを置いている。化学プラントの場合は、爆発、火災などが重要な影響と規定されている。
LEAF	・影響評価はしない。

⑤ 故障メカニズムの明確化

RCM	・故障影響・確率を基に保全意思決定をするため故障メカニズムを解明する必要はない。
RBI/RBM	・故障メカニズムを追求する方法論は規定されていない。
LEAF	・ストレスから故障に至るメカニズムを整理し、想定された故障がどのような劣化モードによって構成されるかを明らかにする。

⑥ 検査項目の決定

RCM	・過去の保全情報（故障確率）から検査項目を設定する。
RBI/RBM	・リスク評価から、検査を行う部位と、検査項目が決定される。
LEAF	・故障モード及びストレスから、劣化モードを選択し、部品・部位レベルの寿命予測方法と検査項目を設定する。

⑦ 検査周期の決定

RCM	・時間計画予防保全の適用時に、故障確率の発生パターンとの整合性を評価する。
RBI/RBM	・余寿命を評価して検査周期を決定するのではなく、リスクによる優先順位を決定している。
LEAF	・寿命予測の結果によって、検査周期を設定する。

⑧ 保全方式の選択

RCM	・影響の大きさから優先順位を付け、適用可能で有効な保全方式の選択をする(LTA)。
RBI/RBM	・影響の大きいものから、優先的に保全の時期、方法が選択される。
LEAF	・保全方式を選択するステップはない。

RCM は、機器を構成する要素が故障した場合に、それが全体にどのような影響を与えるかを評価し、その大きさから管理すべき部位と故障モードを決め、それに対する有効な保全方式を決定する解析手法である。この中で、FMEA は部品毎に故障モード解析を行い故障の影響を明確にする手法である。また、RCM は過去の保全情報を基に検査周期を設定するが、保全データの蓄積が少ない場合は、故障確率から保全周期を設定できない。この場合は、LTA によって、許容されない故障に対して保全方式の選択判断を行うことが考えられている。

RBI/RBM は、故障の発生確率とそれによって生じる損害額の積をリスクと定義し、リスクの大きい劣化モードを優先的に管理する方法である。リスク評価は、安全に関する評価と、経済性にかかわる評価を行う。故障の発生確率は、化学プラント、機械設備など過去のデータからの蓄積があって、標準的な手法が示されている。影響度も、標準的な手法が示されている。適用分野が異なる場合は、独自の影響度評価手法が必要なことになる。リスクを受容範囲内に納めることを目的として優先順位を付けて保全を行うことにより、保全にかかわる資源を重点配分することができる。

LEAF は機器を構成する機能を部品･部位レベルに分解してその機能を阻害する要因（ストレス）から、劣化モードの推定、故障に至までの過程を整理することで故障発生のメカニズムを論理的に把握し、部品・部位の寿命を予測する手法である。

機器機能展開することで部品・部位の故障を網羅的に抽出することができる。これは、機器を構成する全部品を抽出するために膨大な作業となるために、予め IT を活用したシステム化が必要である。また、機器機能展開と環境条件によって劣化モードの網羅的抽出を行うため、故障メカニズムを解明し、部品故障の関連性を把握することができ、2 次故障に至る故障を整理できる。さらに、部品・部位の寿命を把握することから、従来の年次計画から新たに故障メカニズムに基づく技術的根拠が明確な保全計画の策定やストレスの排除・低減を行うことができる可能性がある。但し、LEAF には部品・部位故障時の影響評価を行って、保全方式を設定する方法ではない。

RCM、RBI/RBM、LEAF の特徴をまとめて表 5.2.1 に示す。網羅性とは、全ての劣化モードに対応することであるが、量が膨大であるために実行には課題がある。さらに、管理すべき重要な部品・部位の抽出も同様である。ここに各要素技術の特徴が表れている。①LEAF は、機器機能展開と故障物理によるクリテイカルコンポーネントの抽出、②RBI/RBM は、網羅性はないものの、リスク（発生確率×影響度）による重要設備の抽出、③RCM は、FMEA などによる方法による抽出である。

寿命予測については、表 5.2.2 に示す方法がある。故障物理に基づく寿命予測は、劣化モデルがないために解答が得られないものもあり、劣化モデルの精度から誤差が大きいものもある。また、運転条件の変更への対応が可能であることや改善対策が導出されるなどの利点がある。

表 5.2.1 RCM、RBI/RBM、LEAF の特徴

項　目	RCM	RBI/RBM	LEAF
網羅性	○	△	○
管理すべき部品・部位の抽出	○	○	○
寿命予測性	△	△	○
故障影響の明確化	○	○	×
論理性/故障メカニズム明確化	×	×	○
検査項目の決定	○	○	○
検査周期の決定	○	○	○
保全方式の選択	○	○	×

過去の実績による予測では確率論的な取扱いが必要であるが、前提条件が一致しないためにゆらぎが大きくなることや得られた結果から改善方策が明らかにならない場合がある。また、答が得られやすい利点がある。

以上を総合すれば、LEAF は網羅性の確保、原因に遡った故障メカニズム、寿命予測に特徴があり、RCM、RBI/RBM は故障影響の把握や保全方式の選択などの経営管理上の利用に特徴があると言える。

表 5.2.2 予測の方法と特徴

1)故障物理に基づく寿命予測	①劣化モデル(現状では劣化モデルが限定的) ②シミュレーションの進歩
2)検査・状態監視	①属性の計測のために適用範囲が限定的 ②コスト高 ③単体機器・部品からプロセス全体に拡大可能か ④センサーの進歩
3)過去の実績による予測	①未経験分野は適用できない ②実績データが多い場合は精度が高い

5．3 今後の設備管理技術の課題と方向

設備管理の目的は、ステイクホルダーの利益の最大化である。アセットマネジメントにより ROA の最大化を目指すこととも言える。ROA は利益/総資本であり、これを、（利益/売上高）×（売上高/総資本）に分解して、前者は売上高利益率、後者は総資本回転率と呼ばれている。電子材料や部材を含む製品のサイクルは一般に短いので、この分野では、売上高を上げることに注力されるため、製品製造プロセスの最適化や設備の立ち上げを短期間に行ってリードタイムを小さくすることが経営ニーズである。したがって、生産部門としての設備管理が必要とされ、スクラップ＆ビルトが中心となるため設備保全の役割は小さい。これに対して、素材などのバルク品の製造やエネルギー変換の分野では、総資本回転率を上げることが有効であり、設備のライフサイクルコストを下げることが求められている。この分野は設備産業であり、高経年設備管理が要求されている。

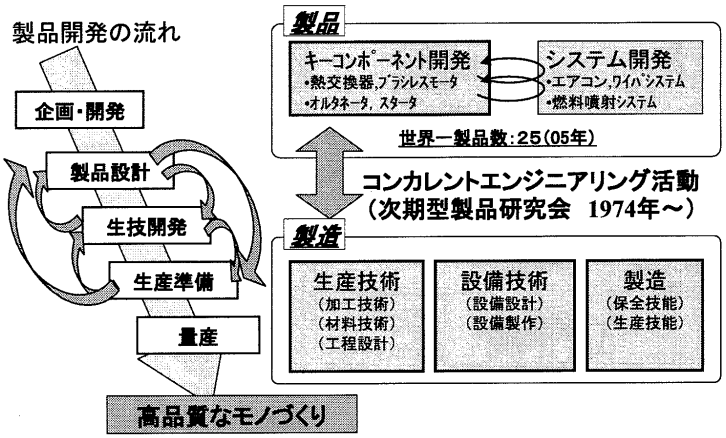

図 5.3.1 製品サイクルが短い場合の生産と設備管理 [3)]

わが国の設備産業の保全管理業務には、以下の課題がある。すなわち、①高経年設備の保全業務の難しさ、②人材の退職に伴う保全ノウハウの消失(2007～2010 年問題)、③自主保安の拡大による設備管理技術の対応があげられる。

高経年設備のメンテナンスは、従来の方式で対処しても、事故を十分に防ぐことは難しく、潜在的なトラブルの予測管理が必要で、特に、劣化管理の網羅性が重要な視点となる。図 5.3.2 に高経年劣化を対象とした設備の信頼性確保の考え方の例を示す。さらに、劣化程度を適切に見極め評価するための、検査、診断、寿命予測、およびデータ管理等の技術が重要である [4)]。

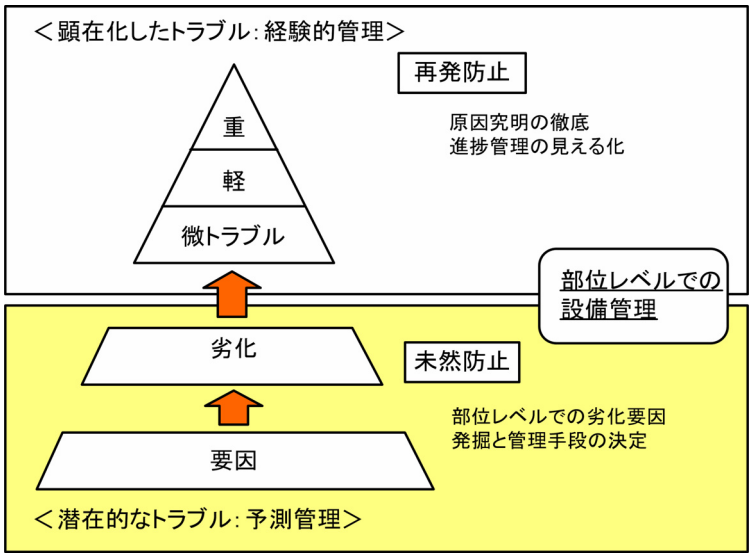

図 5.3.2 設備の信頼性確保の考え方 [5)]

(1) 潜在的な劣化現象の把握と対応

プラントは、必ずしも設計条件下のままで稼働するとは限らない。むしろ、設計条件設定時では想定できない種々の問題を抱えながら稼働し続ける。しかも、運転条件の変更、製品品質の変更、環境の変化等により、稼働条件は変更される。

事故が起こったあとは、その事故解析から必ず原因は判明しており、今までの蓄積と学問的研究から、経験のない高経年設備に対しても考えるべき劣化モードは多くないと予想される。しかし、材料と流体の組み合わせで、例えば配管のある場所にある物質が溜まるなど実際に起こり得る条件は多岐に亘る。これらの関連付けが難しく、劣化現象は分かっているが、何時どこで故障が起こるのかがわからない。条件の組み合わせで劣化する場合があるので、これを見つけるのが課題である。高経年劣化による設備事故として、30 年でボルトが切れた例がある。後から見ればよく分かるが、接している周りの設備が大気環境下で腐食し、そこで発生した水素がボルトに入ったものである。メカニズムは学術的に分かるが、周りの条件で劣化が変わる。このような複合的な原因については、今後の課題である。

これに対して、部品・部位レベルまで分解した設備管理によって大きな前進が期待される。従来手法の延長線上ではなく保全体系を再構築することが求められる。即ち、故障の原因に遡った網羅的な劣化モードを対象とする設備保全体系を構築することである。

(2) 検査・診断技術

プラント資産管理システム PAM は予知保全 CBM の進化したものであり、オンラインでの設備監視、品質性能監視、デバイス監視、点検などの機能を持つ。これに、ライン品質計測と設備状態監視診断が一体となるように、ライン制御などの生産情報と設備検査・診

断情報を統合化させたシステムが期待される。

一方、数学モデルによる予測技術が進展しても完全ではないので、検査・設備診断技術の開発は今後とも極めて重要である。故障物理が進歩しても、予測の精度を上げるためには検査が必要となるが、故障物理により論理的・網羅的な分析をすることによって、管理対象を絞り、その対象を状態監視することが求められる。言い換えれば、寿命予測ができる有効な検査を行うことである。

構造物の安全性や余寿命・危険度などを評価するためには、要素材料の劣化状況や欠陥を検出するための稼動中の監視技術と停止時の非破壊検査が重要な技術である。潜在的劣化現象へ対応したより確度の高い非破壊評価を実現するには、単一の非破壊検査手法のみでは不十分であり、総合的な測定や監視情報の活用が必要である。

(3) データの蓄積と管理システム

①経営戦略システム

経営戦略的システムの実施は、設備保全費をコストと認識するか投資と認識するかで変わる。長期的には、投資と見るべきである。代表的な企業では、経営戦略的な設備管理システムは導入されており、以前から自社開発しているところもある。現時点ではアセットマネジメントシステムである CMMS/EAM などは、設備保全現場で PDCA が回るためのシステムとして使われているものの、ROA と結びついたものにはなっていない。

設備管理によって潜在的なロスを低減することは、アセットマネジメントにつながるものである。未だ普及してはいないが高経年劣化問題を顕在化させて管理するように考えている例もある。総じて現時点は、潜在リスクを洗い出すレベルで、潜在リスクを評価して投資効果を得るとするシステム化やこれらを PDCA に組み入れることは今後の課題である。

②設備管理技術のシステム

高経年設備に対する設備管理では、全ての生データ、加工データが管理されている必要があり、故障物理データを蓄積し、プラントの稼働状況等の条件に対応して、容易に劣化の部位とその程度、劣化速度、保全方式を提供できるなどのコンピュータ支援システムが必要である。

LEAF により設備管理を行っている事例がある。LEAF では設備を機能展開し、各構成要素に対して特定の劣化がどのようなメカニズムで進展するかを故障物理によって想定し、保全カレンダーに反映する仕組みで設備管理を行うとしている。膨大なデータ入力を避けるために設備を型式分類することで機能展開の自動化部分を増加させることや、劣化モードの適用をデータベースから自動検索し数学モデルを適用することでより高度な余寿命計算を目指すとしている。図 5.3.3 に示すループによって予測値と実績データが蓄積されことでより予測精度の高い予測モデルが構築される仕組みのシステムである。

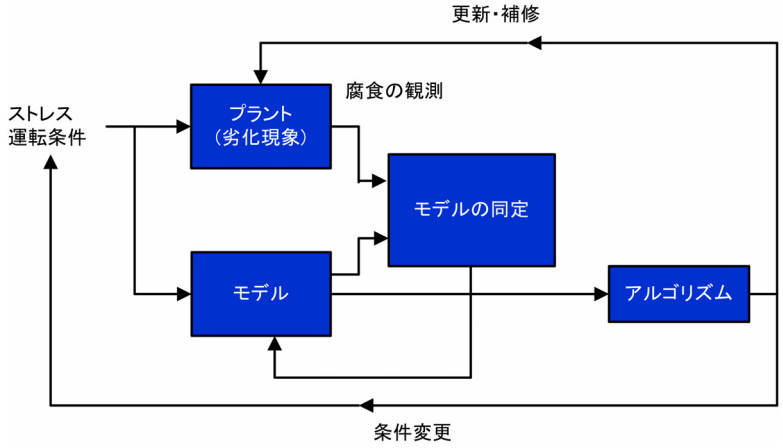

図 5.3.3 設備劣化のモデル予測管理 [6)]

③知識データベースとマネジメント

設計ノウハウなどの知識データは、企業内に多くの蓄積があるように、多くの設備知識データベースがあって、それらにアクセスできるようになっている。しかし、設計や設備管理にどれだけ有効かは評価されていない。設備管理技術が進んでも、今後は複雑な現象を対象とするので、逆に知識データベースの必要性が増すこととなる。保全員がベテランから若手に変わっていくことにもニーズがある。予測するためには、何故この場所で検査が必要なのか等を理解する必要があるので、これらのベテランの知識を技術標準として作成する、あるいは、技術資料としてまとめて誰でも見られるようにすることも進められている。ベテランのノウハウを文書化して残すことや劣化モードの管理・検査などの技術資料を残すことが必要である。知識データベースの構築と有効な活用は今後の課題である。

(4) 設備設計技術との関わり

設備設計に於いては前提条件から耐久性や寿命を加味して設計が行われ基本的な点検・整備の方策はこの段階で定まる。しかしながら、実際の運転状況や設置環境は経済情勢や経営方針により変化することから、保全計画については仕切り直しが必要との認識が保全部門にある。設計で全てを網羅するのは困難であるが、設計で故障の発生を予防し、故障しても休止や事故に至らないように配慮することは可能であることから、設備管理の実績データを設計にフィードバックしながら、設計の段階で設備の信頼性向上と保全業務の負荷軽減を図ることができるような体系の構築が望まれる。このような、設計を含めた PDCA サイクルの構築に関して、設備管理技術のシステム化は今後ますます重要になるであろう。

膨大な設備の詳細データを効率良く設備管理システムに反映することが必要となるが、繰り返してデータを取り、モデルを修正しながら寿命予測精度が向上するためにはデータの系統的な蓄積を可能とする仕組みが重要である。設備の設計段階で設備管理システムを前提とした材料や部品リストを電子メディアで作成し、システムへのデータ取り込みが容

易に行われるような工夫も必要になろう。

(5) 科学技術の発展と設備管理技術

対象とする設備や生産システムは巨大化・複雑化しているので、寿命予測手法は多岐に亘る可能性がある。要因が二次元、三次元になるとどの要因が一番利いているかが分からない。生物システムや工学システムでは要因はいくつも挙げられるので、将来は対応がより複雑になってくる可能性がある。科学技術が今後進む方向はニュアンスともいうべき高次の効果の研究であるとの主張もあり、工学システムの安全性に対してこのような新たな科学の適用も将来有効となる可能性がある。

5.4 まとめ

最近の設備管理技術の主要な要素技術には、RCM、RBI/RBM、LEAF、CBM などがある。LEAF は網羅性の確保、原因に遡った故障メカニズム、寿命予測に特徴があり、RCM、RBI/RBM は故障影響の把握や保全方式の選択などの経営管理上の利用に特徴がある。

設備管理の目的は、ステイクホルダーの利益の最大化であるが、アセットマネジメントによって ROA の最大化を目指すこととも言える。設備産業界では、ライフサイクルコストを下げるため高経年設備管理が要求されている。今後は、従来の方式で対処しても故障を十分に防ぐことは難しく、潜在的な劣化現象を把握して対応することが必要であり、特に、劣化管理の網羅性が重要な視点である。さらに、劣化程度を適切に見極め評価するための、検査、診断、寿命予測、およびデータ管理等の技術が重要である。

参考文献(第 5 章)

1) 大島榮次：検査技術, vol.10, no.11, p.18-25, 2005

2) 財団法人機械システム振興協会/財団法人産業創造研究所 : 高度設備管理技術支援の基盤構築に関する調査研究報告書, 2002.3

3) 小島史夫：日本設備管理学会創立 20 周年記念大会特別企画配布資料、 p .23, 2008.12

4) 佐藤信義：最新保全技術研究会第 I 期報告書; 社団法人日本メンテナンス協会, p.63, 2006.3

5) 渡辺知寛：配管技術, vol.46, no.2, p.56-62, 2004

6) 大島榮次：保守検査シンポジウム講演論文集, vol.2003, p.97-102, 2003.2

第6章 決言

(1) 設備管理技術の変遷

従来は、設備は故障したら修理すると言う考え方が一般的であったが、故障による稼働率の低下を回避するために予防保全が提案された。1960 年代に、アメリカで信頼性中心保全方式 RCM、が開発され、内在する危険、及びその程度を知るためのいくつかの危険度評価手法が開発されてきた。アメリカ石油協会が 1996 年にリスク基準メンテナンス検査計画方法(RBI)を提案し、リスク基準メンテナンス (RBM) 活動が盛んになっている。日本では、故障メカニズムに基づく寿命予測手法である LEAF(Life-span Estimation Analysis based on Failure mechanisms)が提案され実用化が進められている。

(2) 最近の設備事故

設備事故は単に経済的な損失のみならず企業の社会的責任をも問われるほど重要な課題になってきている。近年増加している設備事故の主要な原因は劣化である。背景には高経年設備の増加、団塊ベテラン層の減少、中堅・若手への技能伝承の遅れ、保全費用の圧縮など複合的な要因が挙げられる。設備事故防止に重要な役割を担う設備管理技術の領域においては、網羅性が求められており、発展の目覚ましい IT を積極的に取り入れた設備管理技術体系のさらなる進化が期待される。

(3) 設備管理技術を取り巻く動向

① 米国ではわが国に比べて早くから設備の維持管理基準の検討がされてきた。米国機械学会(ASME)では圧力容器に関して、石油学会(API)では石油プラントの維持規格について検討し、制定してきたが、最近では、両者の合同委員会なども進められ、米国では API 及び ASME とも維持規格の体系が整備されてきたといえる。

わが国においても、原子力発電の維持規格が日本機械学会により 2000 年に制定された。規制緩和の動きと共に、設備の自主保安の動きが加速されてきた。この規制緩和と自主保安は、形式的や建前論に片寄りがちな安全規制から実効性を重視した安全規制への転換が促進されることとなり、このためには、国民の英知を結集して安全の根幹である科学的合理性を追求・活用することや、民間規格策定に一層努めることが必要である。

② 経営戦略的なシステムとして、ROA の視点を取り入れてステイクホルダーの利益を最大化するための設備保全が求められている。背景として、保全の経営的な評価を行うこと、装置産業においては高経年設備が増加し、且つ保全の人材が確保できにくい事情から今後の保全の実行に課題があることがあげられる。CMMS/EAM 等の保全業務の PDCA サイクルを実行するためのシステムや仕組みが存在することを前提として、それらのシステムから保全データを取り込んで評価し、戦略化するというより大きな PDCA を行うことによって新たな戦略システムとすることが進められている。

(4) 設備診断技術の動向と設備管理技術

設備診断技術は設備管理技術の重要な部分を構成している。設備診断技術を視点とした設備保全や設備管理技術の展開について述べると、まず、事後保全から次に展開したのは予防保全 PM(Preventive Maintenance)であるが、この予防保全には経年劣化による故障への対策のみに有効であるとの理論的欠陥があり、それを克服するために予知保全 CBM(Condition Based Maintenance)、および信頼性保全 RCM(Reliability Centered Maintenance)が誕生した。さらに、日本でいう改良保全の欧米版と思われる劣化原因除去型保全であるプロアクテイブ保全 PRM(Proactive Maintenance)が設備保全戦略として提案された。プロアクテイブ保全 PRM は現在欧米で盛んに議論されている方式であるが、設備診断技術の原因系への適用成果として評価できる考え方である。これらの関連技術を包含したシステムとしてプラント資産管理システム PAM がある。

設備診断は過去の様々な手法が開発され、実用化されてきたが、最近は 1 社によってこれらの多くを実施できるようになり、各種の設備診断技術の総合化・システム化が進められている。この結果、精度の向上や設備診断データによる寿命予測などの新たな展開が検討されている。

(5) 今後の設備管理技術と新しい設備産業の展開

最近の設備管理技術の主要な要素技術には、RCM、RBI/RBM、LEAF、CBM などがある。LEAF は網羅性の確保、原因に遡った故障メカニズム、寿命予測に特徴があり、RCM、RBI/RBM は故障影響の把握や保全方式の選択などの経営管理上の利用に特徴がある。

設備管理の目的は、ステイクホルダーの利益の最大化であるが、アセットマネジメントによって ROA の最大化を目指すこととも言える。設備産業界では、ライフサイクルコストを下げるため高経年設備管理が要求されている。今後は、従来の方式で対処しても故障を十分に防ぐことは難しく、潜在的な劣化現象を把握して対応することが必要であり、特に、劣化管理の網羅性が重要な視点である。さらに、劣化程度を適切に見極め評価するための、検査、診断、寿命予測、およびデータ管理等の技術が重要である。

非　売　品

禁無断転載

平　成　２　０　年　度

設備管理技術の新展開に関する調査報告書

発　行　　平成２１年３月

発行者　　社団法人　日本機械工業連合会

〒105-0011

東京都港区芝公園三丁目５番８号

電　話　０３－３４３４－５３８４

株式会社　日鉄技術情報センター

〒108-0074

東京都港区高輪三丁目 25 番 23 号

電　話　０３－５４８８－８７０１